

УДК 551.463

© Д. И. Глуховец^{1,2*}, Ю. А. Гольдин¹, 2022

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (НИУ), 141701, Институтский переулок, д. 9, г. Долгопрудный, Московская область, Россия

*E-mail: glukhovets@ocean.ru

ОБЗОР РАБОТ ОЛЕГА ВИКТОРОВИЧА КОПЕЛЕВИЧА ПО ОПТИКЕ ОКЕАНА

Статья поступила в редакцию 10.02.2022, после доработки 15.03.2022, принята в печать 10.04.2022

Аннотация

Статья посвящена памяти Олега Викторовича Копелевича — доктора физико-математических наук, более 50-ти лет проводившего исследования в области оптики океана и более 30-ти лет руководившего Лабораторией оптики океана Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. В работе представлены основные результаты, полученные О. В. Копелевичем в разных разделах оптики океана. На первом этапе научной деятельности Олег Викторович занимался исследованием светорассеяния в морской воде. По результатам, полученным в океанских экспедициях, было выделено четыре типа индикатрис. Впоследствии О. В. Копелевич разработал малопараметрическую модель первичных оптических характеристик морской воды. С конца 1970-х гг. важное место в его работах занимает разработка спутниковых методов исследования океана, в частности создание и совершенствование региональных биооптических алгоритмов. Использование этих алгоритмов для акваторий морей России стало основой для создания Атласа биооптических характеристик, регулярно издававшегося с 2002 г. Итог использования региональных алгоритмов подведен в коллективной монографии, изданной в 2018 г. Кроме того, О. В. Копелевич внес вклад в исследования световых полей и влияющих на них факторов — облачного покрова и массовых цветений фитопланктона.

Ключевые слова: Олег Викторович Копелевич, оптика океана, рассеяние и поглощение света, малопараметрическая модель оптических свойств морской воды, спутниковые методы океанологии, световые поля

© D. I. Glukhovets^{1, 2*}, Yu. A. Goldin¹, 2022

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 117997, Nahimovsky Pr., 36, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, 141701, Institutskiy lane, 9, Moscow region, Russia

*E-mail: glukhovets@ocean.ru

REVIEW OF OLEG VIKTOROVICH KOPELEVICH'S WORKS ON OCEAN OPTICS

Received 10.02.2022, Revised 15.03.2022; Accepted 10.04.2022

Abstract

The article is dedicated to the memory of Oleg Viktorovich Kopelevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, who has been conducting research in the field of ocean optics for more than 50 years and has been the head of the Ocean Optics Laboratory of the Shirshov Institute of Oceanology for more than 30 years. The paper presents the main results obtained by Dr. Kopelevich in different sections of ocean optics. At the first stage of his scientific activity, he was engaged in the study of light scattering in seawater. He identified four types of seawater scattering phase functions based on the results obtained in ocean expeditions. Subsequently, Dr. Kopelevich developed a low-parameter model of the seawater inherent optical properties. Since the late 1970s, an important place in his work has been the development of satellite methods for studying the ocean, in particular, the creation and improvement of regional bio-optical algorithms. The use of these algorithms for the waters of the Russian seas became the basis for the creation of the Atlas of their bio-optical characteristics, published regularly since 2002. The results of the use of regional algorithms were summed up in a collective monograph published in 2018. In addition, O. V. Kopelevich contributed to the study of light fields and the factors affecting them — cloud cover and mass phytoplankton blooms.

Keywords: Dr. Oleg Viktorovich Kopelevich, ocean optics, light scattering and absorption, low-parameter model of seawater optical properties, satellite methods of oceanology, light fields

Ссылка для цитирования: Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А. Обзор работ Олега Викторовича Копелевича по оптике океана // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 3. С. 9–17. doi:10.48612/fpg/vkp2-4p21-rtbh

For citation: Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Review of Oleg Viktorovich Kopelevich's Works on Ocean Optics. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 3, 9–17. doi:10.48612/fpg/vkp2-4p21-rtbh

Олег Викторович Копелевич родился 14 июля 1940 г. в Москве, скончался 28 декабря 2020 г. в Москве. Вся трудовая биография, вся творческая жизнь Олега Викторовича связана с Институтом океанологии им. П. П. Ширшова, с Лабораторией оптики океана [1]. В 1965 г. он окончил Московский физико-технический институт по специальности химическая физика и был принят в оптическую лабораторию Института океанологии, в которой работал до конца жизни. Лаборатория гидрооптики была основана в 1964 г. М. В. Козляниновым. В 1969 г. отдел оптики Института океанологии возглавил К. С. Шифрин — крупнейший специалист в области оптики рассеивающих сред и решения обратных задач. Он становится научным руководителем Олега Викторовича. В середине 1960-х гг. исследования, проводимые сотрудниками оптической лаборатории, носили в основном географический характер. О. В. Копелевич стал первым физиком, пришедшим в лабораторию и начавшим проведение физических исследований.

За 55 лет Олег Викторович прошел путь от стажера-исследователя до главного научного сотрудника, заведующего лабораторией, которой он руководил более 30-ти лет. Он внес существенный вклад во многие разделы оптики океана. В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1982 г. — докторскую. Олег Викторович — один из основателей международной конференции «Optics of Natural Waters» (ONW), регулярно проводимой с 2001 г. Он был неизменным и активным членом программного комитета конференции, неоднократно был его председателем.

Научную деятельность О. В. Копелевич начал с изучения рассеяния света морской воды и его зависимости от состава морской взвеси. Он проводил измерения

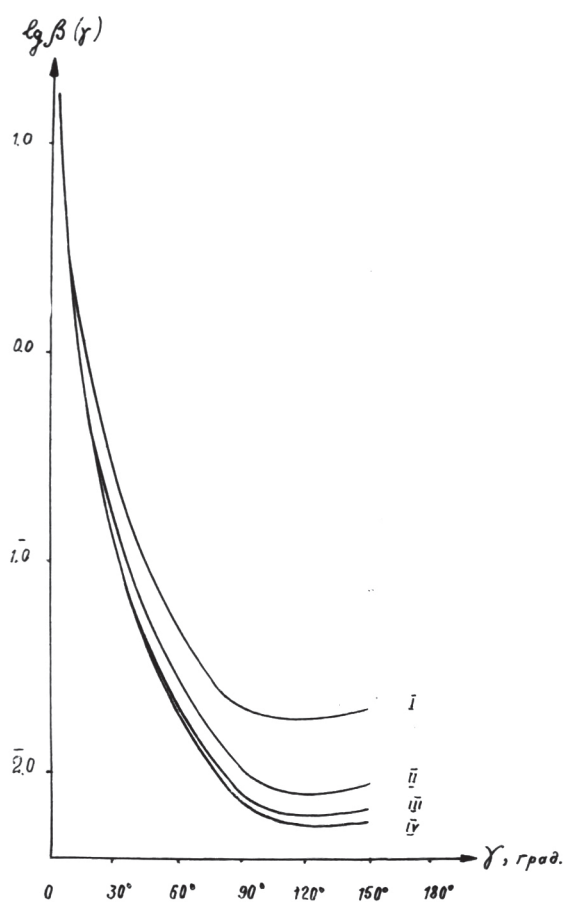


Рис. 1. Абсолютные значения показателя рассеяния в данном направлении, средние для каждого из четырех типов индикатрис (Копелевич О. В. Исследование рассеяния света морской водой. Диссертация канд. физ.-мат. наук. Москва: ИО АН, 1971.)

Fig. 1. Absolute values of the volume scattering functions, averaged for each of the four types of scattering phase functions (Kopelevich O. V. Study of light scattering by sea water Diss. Cand. Phys.-Math. Sci. Moscow, IO RAS, 1971.)

индикатрис рассеяния на визуальном спектрогидронометре-прозрачнометре СГН-57 непосредственно в ходе экспедиций в различных акваториях Мирового океана. Это позволило получить достаточно большой массив данных о форме индикатрис для вод с различными оптическими характеристиками и в результате статистической обработки выделить 4 типа индикатрис (рис. 1). Однако СГН-57 не позволял проводить измерения в области малых углов, где форма индикатрисы наиболее чувствительна к распределению частиц взвешенного вещества по размерам. В дальнейшем под его непосредственным руководством был подготовлен и успешно применен в экспедиционных условиях специальный прибор, позволяющий с точностью не ниже 10% и угловым разрешением 7' измерять показатель рассеяния в области углов от 20' до 7°. Разработанная аппаратура позволила О. В. Копелевичу ввести в практику экспедиционных исследований точный метод измерения рассеяния в области малых углов, наиболее важной как с точки зрения распределения энергии рассеянного света, так и для решения обратной задачи рассеяния. Полученные результаты О. В. Копелевич обобщил в кандидатской диссертации «Исследование рассеяния света морской водой». Он показал, что различия формы индикатрис рассеяния объясняются изменением количественного и качественного состава взвеси. В настоящее время измерения малоугловой индикатрисы рассеяния для восстановления параметров взвешенных частиц используются в практике океанологических исследований, в частности, в лазерном дифрактометре LISST, производимым американской компанией Sequoia Scientific.

В середине 1970-х гг. Олег Викторович расширил сферу научных интересов, добавив исследования показателей поглощения и ослабления морской воды. Для этого под его руководством были созданы соответствующие приборы. По-прежнему, все измерения проводились на пробах морской воды в ходе океанских экспедиций в раз-

ные районы Мирового океана. Основным результатом этого периода — создание малопараметрической модели первичных оптических характеристик морской воды [2, 3]. Модель стала основой докторской диссертации «Оптические свойства океанской воды». Модель позволяет рассчитывать спектральные характеристики показателей рассеяния, поглощения и ослабления, а также угловые характеристики рассеяния по ограниченному набору данных измерений. Модель включает статистические соотношения для расчетов:

- спектральных показателей поглощения $a(\lambda)$ в диапазоне 390–490 нм через их значения для одной или двух длин волн;
- показателей рассеяния в данном направлении $\beta(\theta, 550)$ в угловом диапазоне 0,5–135° и общего показателя рассеяния b через значения $\beta(\theta, 550)$ для одного-трех углов рассеяния;
- спектральных показателей ослабления $c(\lambda)$ в видимом 390–490 и ультрафиолетовом 270–390 нм диапазонах через их значения для двух длин волн в видимой области и одной в ультрафиолетовой.

Предложенные спектральные и угловые модели основаны на результатах статистического анализа данных измерений и использовании разложения спектральных или угловых зависимостей по собственным векторам их ковариационных матриц. Результаты статистического анализа показали, что во всех случаях точность таких разложений оказывается удовлетворительной при использовании лишь нескольких первых членов. Коэффициенты соответствующего разложения находятся по данным измерений лишь для одного-трех значений аргумента [3].

В качестве примера ниже представлены соотношения из малопараметрической модели рассеяния света. Эта модель основана на предположении, что изменчивость рассеяния обусловлена изменением концентраций двух фракций морской взвеси — мелкой и крупной, а удельное рассеяние каждой из фракций постоянно. Модель имеет вид:

$$\beta(\theta, 550) = \beta_{sw}(\theta, 550) + v_m \beta_m^*(\theta) + v_k \beta_k^*(\theta), \quad (1)$$

где $\beta(\theta, 550)$ — показатель рассеяния в данном направлении морской воды для длины волны 550 нм, $\beta_{sw}(\theta, 550)$ — «чистой морской воды», v_m — объемная концентрация мелкой фракции (см³/м³; частицы с радиусами меньше 1,3 мкм и относительным показателем преломления 1,15); v_k — объемная концентрация крупной фракции (см³/м³; частицы с радиусами больше 1,3 мкм и относительным показателем преломления 1,03); $\beta_m^*(\theta, 550)$ и $\beta_k^*(\theta, 550)$ — удельные показатели рассеяния в данном направлении мелкой и крупной фракций (м⁻¹ ср⁻¹), которые предполагаются неизменными. Эти величины табулированы [3]. В модели предполагается, что мелкие частицы в основном терригенного происхождения, крупные — биогенного.

На рисунке 2 показаны вклады трех компонентов модели в общее рассеяние морской воды.

Из рисунка 2 видно, что рассеяние на углах меньше 2° определяется практически полностью крупной фракцией взвеси; начиная с угла примерно 15° для приведенного случая — мелкой фракцией; на углах больше 90° заметный вклад вносит вода. Это важная информация для разработки метода оценки гранулометрического состава морской взвеси, из которой следует, что для оценки содержания крупных частиц надо использовать данные измерений в области малых углов рассеяния, мелких — больших [3, 4]. Входные параметры модели (1) v_m и v_k можно определить по данным измерений рассеяния под двумя углами — один из области малых (1°), другой — больших (45°) углов. Относительная ошибка аппроксимации $\beta(\theta, 550)$ моделью (1), осредненная по диапазону углов рассеяния 0,5–135°, ~20%. Автор отметил, что речь идет о модели океанской воды —

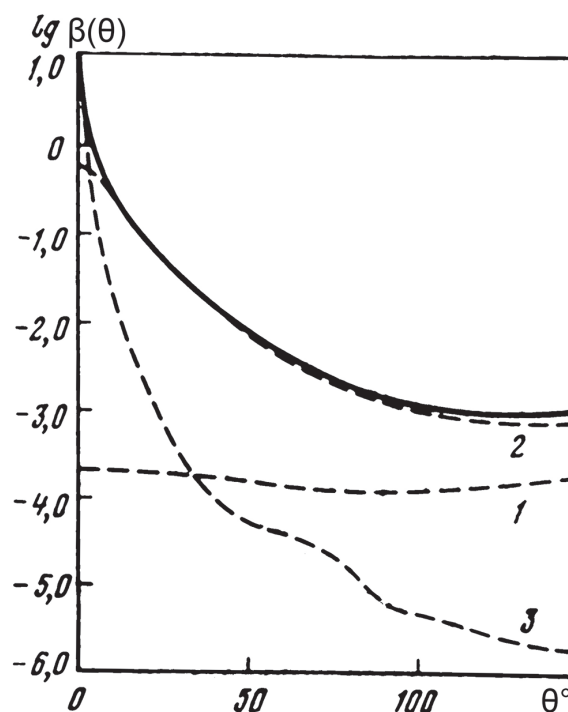


Рис. 2. Составляющие физической модели рассеяния света океанской воды при объемной концентрации мелкой и крупной фракций взвеси $v_m = v_k = 0,1$ см³/м³. Сплошная линия — показатель рассеяния в данном направлении $\beta(\theta)$ морской воды; 1 — чистая морская вода, 2 — мелкая взвесь, 3 — крупная взвесь [3]

Fig. 2. Components of the physical model of ocean water light scattering at the volume concentration of fine and coarse suspended matter fractions $v_m = v_k = 0,1$ cm³/m³. The solid line is the volume scattering function $\beta(\theta)$ of seawater; 1 — pure sea water, 2 — fine suspension, 3 — coarse suspension [3]

в прибрежных водах можно ожидать присутствия крупных минеральных частиц с показателями преломления 1,15 и более, которые в океанской воде отсутствуют, поскольку осаждаются вблизи берега. Тем не менее модель (1) удовлетворительно работает и в прибрежных водах [5], а также в области кокколитофоридного цветения в Баренцевом море [6].

Модель позволяет также рассчитывать спектральные величины показателей рассеяния:

$$b(\lambda) = b_{sw}(550) \cdot (\lambda/550)^{-4,2} + v_m b_m^*(550) \cdot (\lambda/550)^{-1,7} + v_k b_k^*(550) \cdot (\lambda/550)^{-0,3}, \quad (2)$$

где $b_{sw}(550)$ — показатель рассеяния чистой морской воды для длины волны 550 нм, $b_m^*(550)$ и $b_k^*(550)$ — удельные показатели рассеяния для мелкой и крупной фракций взвеси для этой длины волны. Значение $b_{sw}(550)$ для океанской воды соленостью 35 ‰ при температуре 20° равно $2,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ [4]; значения $b_m^*(550)$, $b_k^*(550)$, соответственно, 1,34 и $0,312 \text{ м}^{-1}$ [7]. Аналогичную формулу можно написать и для показателя рассеяния назад $b_b(\lambda)$.

Для спектральных зависимостей $b(\lambda)$ и $b_b(\lambda)$ приемлемой оказывается и простая однопараметрическая модель:

$$b(\lambda) = b_{sw}(550) \cdot (\lambda/550)^{-4,2} + b_p(550) \cdot (\lambda/550)^{-n}, \quad (3)$$

где $b_p(550)$ (или $b_{bp}(550)$) — показатель рассеяния взвешенными частицами (или показатель рассеяния назад взвешенными частицами) для длины волны 550 нм, n зависит от типа вод. Показатели n для вод открытого океана можно принять равными 1,0 и 1,45 для общего показателя рассеяния и рассеяния назад, соответственно; для прибрежных вод, где значения $b(550) \geq 1 \text{ м}^{-1}$, оба показателя будут близки к 0 из-за присутствия крупных минеральных частиц [3, 8, 9].

Важно отметить, что соотношения (1–3) актуальны в настоящее время, в первую очередь, для гидрооптического моделирования с использованием спутниковых данных.

Продолжением работ по развитию малопараметрической модели можно считать работу [7], в которой приведены корреляционные соотношения для длины волны 550 нм, позволяющие через показатель ослабления c рассчитать показатели поглощения a (4) и рассеяния b (5), а также вероятность выживания фотона ω_0 (6). Эти соотношения основаны на данных измерений, полученных в 70 различных точках Мирового океана в диапазоне $c = 0,08–2,5 \text{ м}^{-1}$ и справедливы для большинства прибрежных и открытых районов Мирового океана.

$$b = 0,944c - 0,048, \quad (4)$$

$$\omega_0 = b/c = 0,944 - 0,048/c, \quad (5)$$

$$a = c - b = 0,056c + 0,048. \quad (6)$$

Особое место среди работ О. В. Копелевича занимает исследование оптических свойств вод Амазонки, существенно отличающихся от океанских. Исследования были выполнены в ходе 9-го рейса НИС «Профессор Штокман» (1983 г.), который проводился в бассейне Амазонки. Олег Викторович любил рассказывать про этот экзотический рейс и полученные в нем результаты. Измеренные в эстуарии Амазонки величины показателя ослабления достигали нескольких сотен м^{-1} [10]. Был оценен коэффициент горизонтального перемешивания при слиянии крупнейших притоков Амазонки и объективизирована общепринятая классификация амазонских вод, основанная на их видимой окраске, а также были даны количественные характеристики цвета разных вод в соответствии с международной колориметрической системой. Эти результаты представляли существенный интерес для интерпретации данных спутниковых измерений цвета, а оптические измерения в эстуарии реки Амазонка помогли составить достаточно полную картину распространения и трансформации взвешенного вещества, выносимого в прилегающий район Атлантического океана.

В последний достаточно продолжительный период жизни основным направлением научной деятельности Олега Викторовича стали разработка и практическое применение оптических методов дистанционного зондирования океана из космоса. О. В. Копелевич начал заниматься оптическими спутниковыми данными на самом раннем этапе их развития. В 1976–1978 гг. он принял активное участие в разработке алгоритмов обработки данных спутникового многоканального спектрометра МКС, создаваемого специалистами Института электроники АН ГДР в рамках программы «Интеркосмос». В то время спутниковые данные о цвете океана отсутствовали (первый спутниковый сканер цвета CZCS был запущен лишь в октябре 1978 г.). Натурные испытания разработанных алгоритмов были проведены на Черном море с использованием технологического образца МКС.

Начиная с 1990-х гг., О. В. Копелевич активно развивает методы использования данных спутниковых сканеров цвета для исследования и мониторинга морей и океанов. Основные работы этого периода посвящены верификации алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых данных о цвете вод и биооптических алгоритмов путем сопоставления данных судовых и спутниковых измерений. По этим данным разработаны региональные биооптические алгоритмы, существенно повысившие по сравнению со стандартными точность определения значений биооптических характеристик морской воды [11]. В Лаборатории оптики океана ИО РАН, начиная с 2002 г., выпускаются электронные атласы биооптических характеристик морей России, построенные по данным спутниковых сканеров цвета (<http://optics.ocean.ru>). Итог работы, проведенной под руководством Олега Викторовича сотрудниками Лаборатории оптики океана по использованию данных спутниковых наблюдений, выполненных современными сканерами цвета за 20 лет — с 1998 по 2017 гг. представлен в коллективной монографии «Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг.» [12] (рис. 3).

Материалы, представленные в Атласе, дают возможность заинтересованным специалистам-океанологам (в первую очередь, биологам и геологам) получить представление о сезонной и межгодовой изменчивости биооптических характеристик в исследованных морях, которую реально можно изучить только с помощью спутниковых данных, и о некоторых интересных явлениях, обуславливающих эту изменчивость, например, цветении фитопланктона, в частности, кокколитофорид. Использование регионального алгоритма расчета концентрации Хл позволило повысить точность оценок величины первичной продукции Карского моря [13].

С изданием Атласа значительная часть исследований Лаборатории оптики океана снова стала носить географический характер, но уже на новом современном уровне.

Для создания и верификации спутниковых региональных биооптических алгоритмов необходимы результаты экспедиционных исследований, получаемых с помощью комплекса специальной аппаратуры. Олег Викторович был инициатором и руководителем создания плавающего спектрорадиометра ПРО-1 (рис. 4), предназначенного для измерения спектральной яркости восходящего излучения непосредственно под поверхностью моря и спектральной облученности поверхности моря [14]. По полученным данным рассчитывается спектральный коэффициент яркости водной толщи. ПРО-1 стал основным прибором для проведения судовых подспутниковых измерений, выполняющихся сотрудниками Лаборатории на протяжении более 20-ти лет.

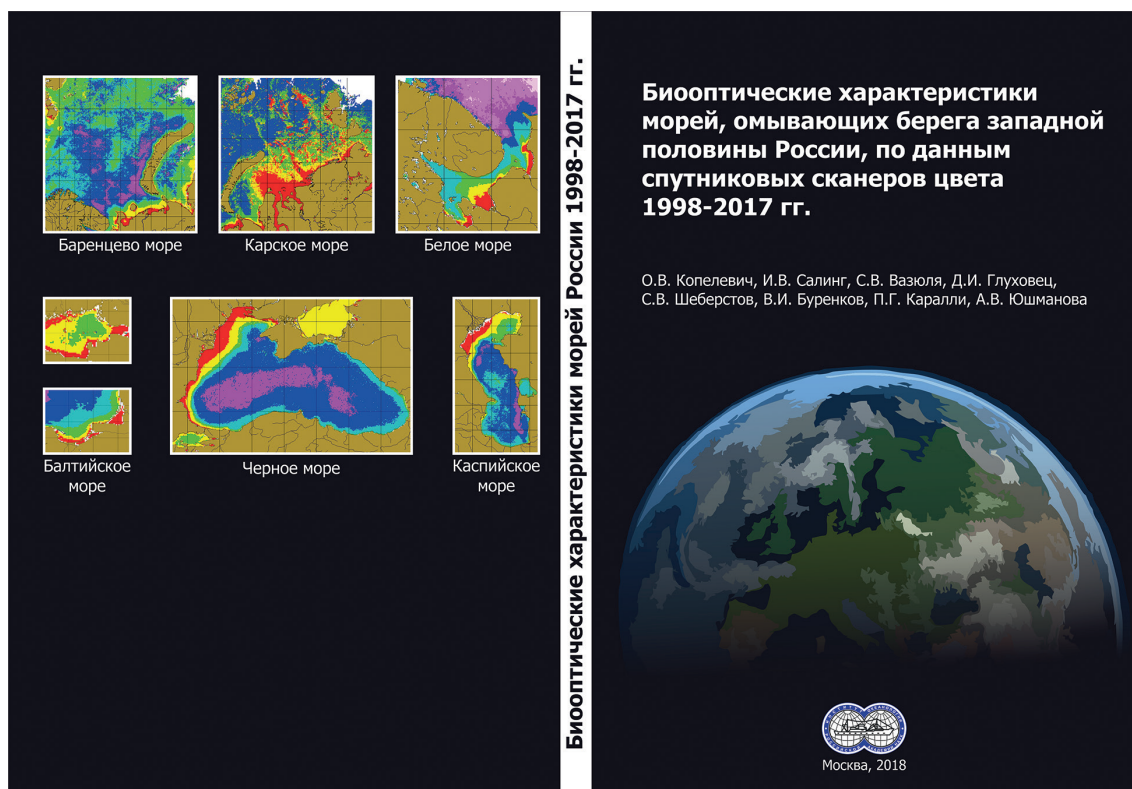


Рис. 3. Обложка монографии [12]

Fig. 3. Cover of the monograph [12]

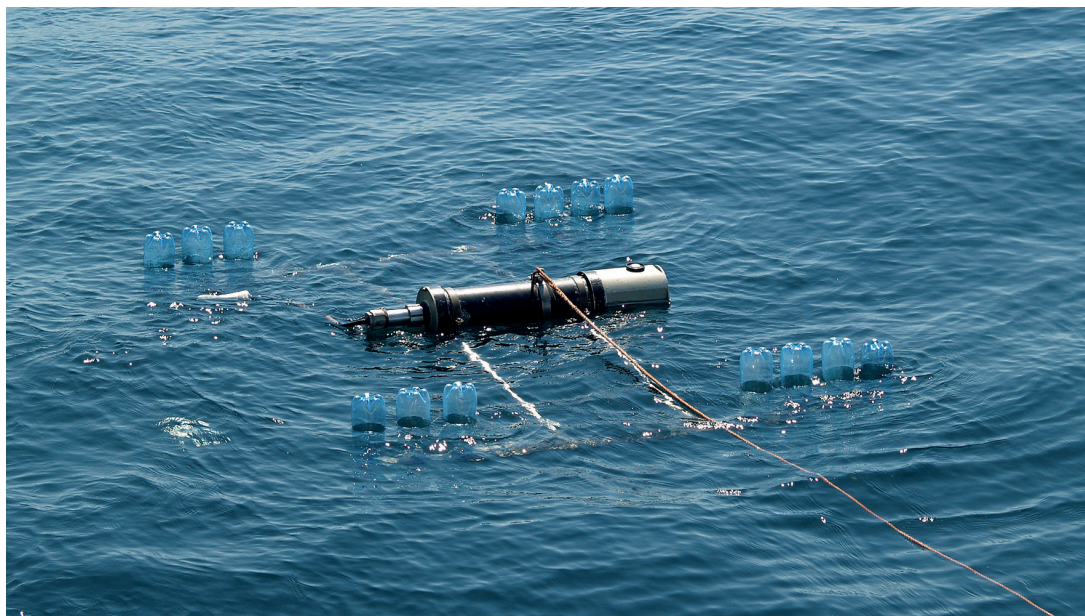


Рис. 4. Измеритель спектрального состава выходящего из водной толщи излучения ПРО-1

Fig. 4. Measuring instrument for the spectral composition of water leaving radiation PRO-1

Кроме того, Олег Викторович участвовал в разработке малогабаритного универсального прозрачноте-ра [15], а также методики определения показателя поглощения морской воды с помощью прибора, осно-ванного на использовании интегрирующей сферы, заполняемой пробами воды [16].

Интересы Олега Викторовича не ограничивались российскими морями. Спутниковые данные исполь-зовались для анализа процессов, происходящих в поверхностном слое Атлантического океана. Например, в работе [17] выполнены расчеты глобальных трендов изменения температуры поверхности, концентрации хлорофилла и площади облачного покрова для разных широтных поясов Атлантического океана от 60°ю.ш. до 60°с.ш.; приведены полученные результаты с оценкой возможных ошибок.

В последние годы возросла актуальность проблемы климатических изменений. В работе [18] был пред-ложен дополнительный список климатически значимых биооптических параметров океана — спектраль-ный коэффициент яркости моря, показатель диффузного ослабления света морской водой и фотосинте-тически активная радиация (ФАР). Совокупность этих трех переменных дает возможность приближенно оценивать не только ФАР, поступающую на поверхность, но и ФАР, вышедшую из-под поверхности и от-раженную от поверхности, а также поглощенную в водной толще.

Большое внимание Олег Викторович также уделял исследованиям световых полей в толще морской воды. В начале 2000-х гг. опубликована серия статей, посвященных методу оценки проникновения видимого и ульт-рафиолетового солнечного излучения в воды арктических морей на основе анализа спутниковых данных, в том числе при наличии облачного покрова [19–21]. Разработанная методика позволила выполнить расчет баланса фотосинтетически активной радиации в Баренцевом море по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS [22]. В последствии опубликована работа, в которой выполнена оценка проникновения солнечной радиации видимого диапазона в воды Баренцева моря с учетом влияния кокколитофоридных цветений [23].

В 2019–2020 гг. Олег Викторович был приглашенным редактором специального выпуска журнала Journal of Marine Science and Engineering, посвященного световым полям. Для этого выпуска О.В. Копе-левичем с соавторами была подготовлена большая работа [6]. В ней расчет подводного светового поля вы-полнялся посредством двух численных методов — усовершенствованным методом дискретных ординат DISORT и Монте Карло. Расчеты проводились для наборов оптических характеристик, полученных по данным экспедиционных измерений и соответствующих реальным ситуациям. Исследована связь между параметрами светового поля и спектральными коэффициентами яркости водной толщи, проанализиро-вана точность используемых приближенных формул (рис. 5). Используя результаты точных расчетов, оце-нены ошибки четырех наиболее часто используемых формул для оценки коэффициента яркости водной толщи. Даны величины ошибок рассматриваемых приближенных формул, в зависимости от параметров кокколитофоридных цветений, и рекомендации по их использованию.

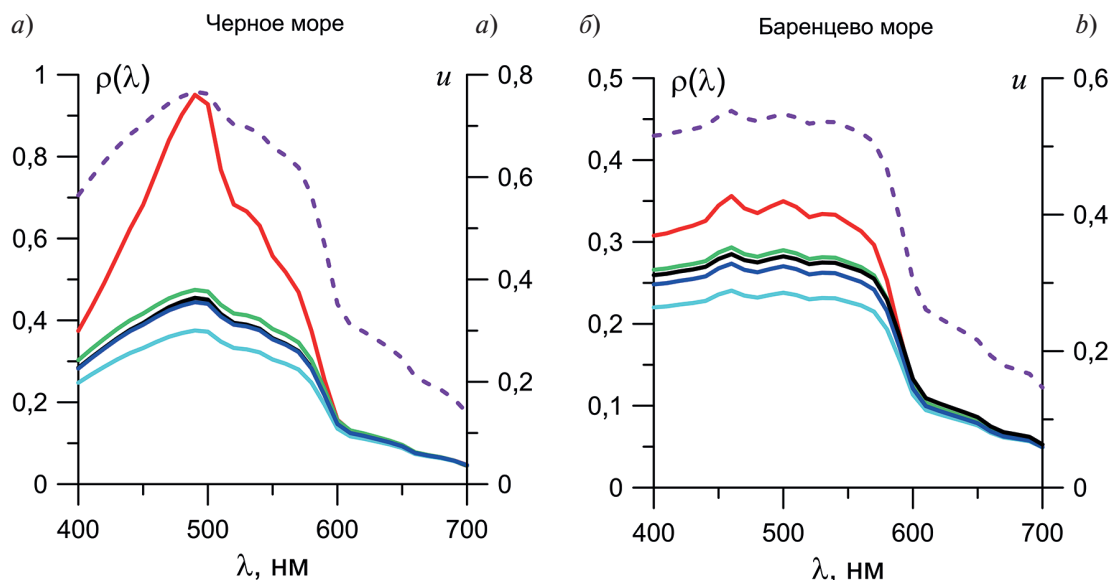


Рис. 5. Значения спектральных коэффициентов яркости водной толщи: точное решение (черная кривая) и результаты приближенных формул (цветные кривые). Концентрация кокколитофорид 10^7 кл./л. a — Черное море, $a(440) = 0,09 \text{ м}^{-1}$, $\theta_0 = 25^\circ$; b — Баренцево море, $a(440) = 0,18 \text{ м}^{-1}$, $\theta_0 = 60^\circ$

Fig. 5. Values of seawater spectral reflectance coefficients: exact solution (black curve) and results of approximate formulas (color curves). The concentration of coccolithophores is 10^7 cells/l. a — Black Sea, $a(440) = 0,09 \text{ м}^{-1}$, $\theta_0 = 25^\circ$; b — the Barents Sea, $a(440) = 0,18 \text{ м}^{-1}$, $\theta_0 = 60^\circ$

О. В. Копелевич опубликовал более 190 научных работ, является соавтором 8-ми коллективных монографий. За научные достижения он награжден Знаком К. Э. Циолковского (2008 г.) и медалями «За международное сотрудничество в области космических исследований» (2009 г.), А. А. Лебедева оптического общества имени Д. С. Рождественского (2010 г.), премией на конкурсе МАИК «Наука» за цикл статей «Использование данных спутниковых наблюдений цвета вод в океанологических исследованиях», опубликованных в 1999–2001 гг. О. В. Копелевич — лауреат премии Совета Министров СССР (1990 г.).

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0128-2021-0001.

Funding

The work was carried out within the framework of the state task on theme No. 0128-2021-0001.

Литература

1. Гольдин Ю.А., Глуховец Д.И. К 80-летию О.В. Копелевича // Океанологические исследования. 2020. Т. 48, № 2. С. 173–179. doi:10.29006/1564–2291.JOR-2020.48(2).12
2. Копелевич О.В., Шифрин К.С. Современные представления об оптических свойствах морской воды // Оптика океана и атмосферы / ред. К.С. Шифрин. М.: Наука, 1981. С. 4–55.
3. Копелевич О.В. Малопараметрические модели оптических свойств морской воды // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. С. 208–234.
4. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 278 с.
5. Kopelevich O.V. The current low-parametric models of seawater optical properties // Proceedings of the II International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters” (ONW’2001), St. Petersburg: D.S. Rozhdestvensky Optical Society, 2001. P. 18–23.
6. Kopelevich O., Sheberstov S., Vazyulya S. Effect of a coccolithophore bloom on the underwater light field and the albedo of the water column // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. 8(6):456. doi:10.3390/jmse8060456
7. Левин И.М., Копелевич О.В. Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм // Океанология. 2007. Т. 47, № 3. С. 374–379.

8. Буренков В.И., Гуревич И.Я., Копелевич О.В., Шифрин К.С. Спектры яркости выходящего излучения и их изменение с высотой наблюдения // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 41–58.
9. Mobley C.D. Light and water: radiative transfer in natural waters. Academic Press, 1994. 592 p.
10. Монин А.С., Копелевич О.В. Гидрооптическое влияние Амазонки на океан // Доклады АН СССР. 1983. Т. 273, № 6. С. 1482–1486.
11. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Sheberstov S.V., Evdoshenko M.A. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2004. Vol. 51, N 1. P. 1063–1091. doi:10.1016/S0967-0645(04)00101-8
12. Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. / Отв. ред. д. ф.-м. н. О.В. Копелевич. Москва: Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, 2018. 140 с. URL: https://optics.ocean.ru/Atlas_2019/8_Monography_2018.pdf (дата обращения: 15.01.2022).
13. Demidov A.B., Kopelevich O.V., Mosharov S.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: development and skill assessment of regional algorithms // Journal of Sea Research. 2017. Vol. 125. P. 1–17. doi:10.1016/j.seares.2017.05.004
14. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрометрический прибор и его метрология // Океанология. 2000. Т. 40, № 1. С. 148–155.
15. Патент RU2341786: URL: <https://findpatent.ru/patent/234/2341786.html> (дата обращения 5.02.2022).
16. Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Копелевич О.В., Зайцева А.Ф., Погосян С.И. Измерения показателя поглощения морской воды с помощью интегрирующей сферы // Светотехника. 2017. № 5. С. 39–43.
17. Шеберстов С.В., Копелевич О.В., Лукьянова Е.А. Анализ межгодовых трендов температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла в Атлантическом океане по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 274–282.
18. Копелевич О.В., Костяной А.Г. Использование биооптических параметров океана, определяемых по спутниковым данным, в качестве основных климатических переменных // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. № 3. С. 8–29. doi:10.21513/2410-8758-2018-3-8-29
19. Васильков А.П., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Ершова С.В., Кротков Н.А. Модель для расчетов переноса ультрафиолетового излучения в водах арктических морей // Океанология. 1999. Т. 39. С. 192.
20. Ершова С.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. Метод оценки проникновения видимого и ультрафиолетового солнечного излучения в воды арктических морей на основе спутниковых данных: случай безоблачной атмосферы // Океанология. 2001. Т. 41, № 3. С. 335–343.
21. Ершова С.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. Метод оценки проникновения солнечного излучения в воды арктических морей на основе спутниковых данных: случай сплошной облачности // Океанология. 2002. Т. 42, № 1. С. 22–31.
22. Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В., Шеберстов С.В., Набиуллина М.В. Оценка баланса фотосинтетически активной радиации в Баренцевом море по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS // Океанология. 2003. Т. 43, № 6. С. 834–845.
23. Копелевич О.В., Вазюля С.В., Григорьев А.В., Храпко А.Н., Шеберстов С.В., Салинг И.В. Проникновение солнечной радиации видимого диапазона в воды Баренцева моря в зависимости от облачности и кокколитофоридных цветений // Океанология. 2017. Т. 57, № 3. С. 445–453. doi:10.7868/S0030157417020095

References

1. Goldin Yu.A., Glukhovets D.I. Celebrating the 80-th jubilee of Dr. Oleg Kopelevich. *Journal of Oceanological Research*. 2020, 48, 2, 173–179 (in Russian). doi:10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(2).12
2. Kopelevich O.V., Shifrin K.S. Modern ideas about the optical properties of sea water. *Optics of the Ocean and Atmosphere*, ed. K.S. Shifrin. M., Nauka, 1981, 4–55 (In Russian).
3. Kopelevich O.V. Low-parameter models of optical properties of seawater. *Ocean Optics*. T.1. Physical optics of the ocean. M., Nauka, 1983, 208–234 (In Russian).
4. Shifrin K.S. Introduction to ocean optics. L., Gidrometeoizdat, 1983. 278 p. (in Russian).
5. Kopelevich O.V. The current low-parametric models of seawater optical properties. *Proceedings of the II International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters” (ONW’2001)*, St. Petersburg, D.S. Rozhdestvensky Optical Society, 2001, 18–23.

6. Kopelevich O., Sheberstov S., Vazyulya S. Effect of a coccolithophore bloom on the underwater light field and the albedo of the water column. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020, 6, 456. doi.org/10.3390/jmse8060456
7. Levin I.M., Kopelevich O.V. Correlations between the inherent hydrooptical characteristics in the spectral range close to 550 nm. *Oceanology*. 2007, 47, 3, 344–349 doi:10.1134/S000143700703006X
8. Burenkov V.I., Gurevich I. Ya., Kopelevich O.V., Shifrin K.S. Brightness spectra of outgoing radiation and their change with observation height. *Optical Methods for Studying Oceans and Inland Waters*. Novosibirsk, Nauka, 1979, 41–58 (In Russian).
9. Mobley C.D. Light and water: Radiative transfer in natural waters. *Academic Press*, 1994. 592 p.
10. Monin A.S., Kopelevich O.V. Hydrooptical influence of the Amazon on the ocean. *Doklady Academy of Sciences of the USSR*. 1983, 273, 6, 1482–1486 (In Russian).
11. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Sheberstov S.V., Evdoshenko M.A. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004, 51, 1, 1063–1091. doi:10.1016/j.dsr2.2003.10.009
12. Kopelevich O.V., Saling I.V., Vazyulya S.V., Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Karalli P.G., Yushmanova A.V. Biooptical characteristics of the seas washing the shores of the western half of Russia, according to satellite color scanners 1998–2017 / Ed. Managing editor Dr. O.V. Kopelevich. *Moscow, Shirshov Institute of Oceanology*, 2018. 140 p. URL: https://optics.ocean.ru/Atlas_2019/8_Monography_2018.pdf (In Russian) (Access date: 15.01.2022).
13. Demidov A.B., Kopelevich O.V., Mosharov S.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: development and skill assessment of regional algorithms. *Journal of Sea Research*. 2017, 125, 1–7. doi:10.1016/j.seares.2017.05.004
14. Artem'iev V.A., Burenkov V.I., Vortman M.I., Grigoriev A.V., Kopelevich O.V., Khrapko A.N. Sub-truth measurements of ocean color: a new floating spectroradiometer and its metrology. *Oceanology*. 2000, 40, 1, 139–145 (in Russian).
15. Patent RU2341786: URL: <https://findpatent.ru/patent/234/2341786.html> (access date: 05.02.2022).
16. Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Kopelevich O.V., Zaytseva A.F., Pogosyan S.I. Measuring the sea water absorption factor using integrating sphere. *Light & Engineering*. 2018, 26, 1, 120–126. doi:10.33383/2016–079
17. Sheberstov S.V., Kopelevich O.V., Lukyanova E.A. Analysis of inter-annual trends of sea surface temperature and chlorophyll concentration in the Atlantic Ocean from satellite data. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2011, 8, 4, 274 (in Russian).
18. Kopelevich O.V., Kostyanov A.G. The use of bio-optical parameters of the ocean derived from satellite data as essential climate variables. *Fundamental and Applied Climatology*. 2018, 3, 8–29 (in Russian). doi:10.21513/2410-8758-2018-3-8-29
19. Vasilkov A.P., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Krotkov N.A. A model for calculation of ultraviolet radiation transfer in Arctic waters. *Oceanology*. 1999, 39, 2, 172–180.
20. Ershova S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Khrapko A.N. A method for estimating the penetration of solar visual and ultraviolet radiation into the waters of the Arctic seas using satellite data: the case of a cloudless atmosphere. *Oceanology*. 2001, 41, 3, 317–325.
21. Ershova S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V. A method for estimating the penetration of solar radiation into the waters of the Arctic seas based on satellite data: the case of a totally overcast sky. *Oceanology*. 2002, 42, 1, 17–26.
22. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Vazyulya S.V., Sheberstov S.V., Nabiullina M.V. An assessment of the photosynthetically active radiance balance in the Barents Sea from the data of the SeaWiFS satellite color scanner. *Oceanology*. 2003, 43, 6, 786–796.
23. Kopelevich O.V., Vazyulya S.V., Grigoriev A.V., Khrapko A.N., Sheberstov S.V., Sahling I.V. Penetration of visible solar radiation in waters of the Barents Sea depending on cloudiness and coccolithophore blooms. *Oceanology*. 2017, 57, 3, 402–409. doi:10.1134/S0001437017020096

Об авторах

ГЛУХОВЕЦ Дмитрий Ильич	Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), ROR 00n1e1p60	ORCID ID: 0000-0001-5641-4227, elibrary AuthorID: 924346, e-mail: glukhovets@ocean.ru
ГОЛЬДИН Юрий Анатольевич	Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова, Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), ROR 00n1e1p60	ORCID ID: 0000-0001-5731-5458, Scopus Author ID: 6602648464, elibrary AuthorID: 58653, e-mail: goldin@ocean.ru