

# Использование видимого излучения при освоении и исследовании морей и океанов

О.В. КОПЕЛЕВИЧ

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва  
E-mail: oleg@ocean.ru

## Аннотация

Рассматриваются проблемы и возможности использования видимого излучения при освоении и исследовании морей и океанов. Основная особенность морской воды как среды, в которой распространяется свет, заключается в том, что это светорассеивающая среда, причём в большинстве практически важных случаев рассеяние преобладает над поглощением. Поэтому для теоретических оценок распространения в водной среде солнечного света и излучения от искусственных источников требуется использовать решения интегро-дифференциального уравнения переноса излучения, что потребовало развития различных специальных методов. Измерение параметров световых полей в водной среде также связано со значительными трудностями, обусловленными, в первую очередь, погодными условиями — облачностью, поверхностным волнением. Теория подводного видения имеет свою специфику, особенно в случае наблюдения подводных объектов через взволнованную морскую поверхность. В обзоре приведён интересный пример, относящийся к этой проблеме. Другой пример иллюстрирует современные возможности подводного видения на самых больших океанских глубинах. Свет как инструмент для исследования и мониторинга морской среды имеет важные достоинства и даже явные преимущества перед другими методами. Одно из них — способность света проходить через поверхность моря с малыми потерями (в отличие от микроволнового излучения и звука), что позволяет применять дистанционное световое зондирование подповерхностного слоя океана (с борта судна, авианосителей, спутников). С появлением лидаров, использующих для зондирования лазерные импульсы, и развитием спутниковых наблюдений, дистанцион-

ные оптические методы получают всё более широкое распространение.

**Ключевые слова:** свет, светорассеивающая среда, теория переноса излучения, фотометрия, распространение солнечного излучения, подводная видимость, лидары, спутниковые наблюдения.

## 1. Введение

Данный обзор посвящён использованию видимого излучения (далее — свет) при освоении морей и океанов, а стало быть, и при их исследовании. Автор надеется, что рассматриваемые проблемы будут интересны читателям журнала «Светотехника», в первую очередь тем, кто интересуется не только конструкторской и технологической разработкой светотехнических установок, их проектированием, монтажом и эксплуатацией, но и исследованием распространения света в различных средах, измерением его характеристик, преобразования его энергии в другие виды энергии и использования, помимо освещения, и для других целей [1]. Здесь уместно отметить, что и основоположник фотометрии француз Пьер Бугер, и один из творцов современной фотометрии советский учёный А.А. Гершун уделяли в своих работах немалое внимание «морской» тематике. Так, Бугер измерял в лабораторных условиях прозрачность морской воды, предложил эмпирические формулы зависимости коэффициента отражения от угла падения при отражении света от поверхности воды, вывел экспоненциальный закон ослабления света при его прохождении через поглощающую среду, построил теорию видимости предметов через мутную среду и применил её к расчёту предельной глубины видимости погружённых в воду предметов [2]. А.А. Гершун был одним из авторов первой в мире монографии по оптике моря «Прозрачность и цвет моря» [3], занимался подводным освещением и более общими теоретическими

и экспериментальными проблемами фотометрии мутных сред [4, с. 85–103; 397–400; 430–438].

Морская вода как среда, в которой распространяется свет, имеет важную особенность, которая определяет специфику оптики океана как науки, — это светорассеивающая среда, причём в большинстве практически важных случаев рассеяние преобладает над поглощением. Фотоны в водной среде испытывают в среднем большее число актов рассеяния, чем поглощения. Поэтому для описания взаимодействия света с морской средой должна использоваться теория многократного рассеяния, или теория переноса излучения. Эта теория носит достаточно универсальный характер и, вообще говоря, применима и в оптике атмосферы, и в астрофизике, и в теории переноса нейтронов. Однако специфика оптических свойств морской воды обуславливает определённые ограничения использования в гидрооптике результатов теории переноса, полученных в других областях. Оптические характеристики морской воды — главный фактор, определяющий распространение в воде света, как естественного, так и от искусственных источников.

Оптические явления в морях и океанах с давних времён привлекали внимание человека, и в первую очередь, моряков. Не случайно приоритет в проведении оптических измерений непосредственно в море принадлежит мореплавателю, капитану российского флота О.Е. Коцебу, который первым стал количественно оценивать прозрачность океанских вод, наблюдая глубину исчезновения из виду погружаемых предметов. Интерес к оптике моря особенно возрос после того, как человек сам начал проникать в морские глубины, появился подводный флот. Основные проблемы, которые вызывали практический интерес на этом этапе, — обнаружение и маскировка подводных объектов, видимость под водой, использование подводной фотоаппаратуры. Световой режим на различных глубинах интересует и морских биологов, ведь от него зависит процесс фотосинтеза, определяющий создание первичной биопродукции в морях и океанах.

Возможности инструментального исследования закономерностей распространения света в водной среде

резко возросли после того, как в начале 20-х годов прошлого века на смену фотопластинкам в качестве приёмников света пришли фотоэлементы. Наряду с фотометрами, для измерения подводной освещённости стали использоваться погружаемые прозрачномеры и измерители рассеяния. Натурные гидрооптические исследования стали комплексными — в морских экспедициях одновременно измерялись как фотометрические величины (поверхностная и подводная освещённость, яркость), так и оптические характеристики воды.

Важное достижение начала 20-х годов прошлого века — объяснение цвета моря; в 1922 г., независимо друг от друга и практически одновременно, индийский физик Ч. Раман [5] и советский учёный В.В. Шулейкин [6] показали, что цвет вод объясняется совокупным действием селективного поглощения и рассеяния. Важность этого открытия сейчас подтверждена широким использованием спутниковых сканеров цвета, которые вошли в число наиболее популярных спутниковых измерителей благодаря своей экономической эффективности и широкому набору получаемой информации. Эра спутниковых сканеров цвета началась в 1978 г., когда на американском спутнике *NIMBUS-7* был запущен Сканер цвета прибрежной зоны *CZCS* (Coastal Zone Color Scanner), и в настоящее время спутниковые наблюдения — один из главных инструментов, используемых для исследования и мониторинга морей и океанов.

Другое научно-техническое достижение, определившее новый этап в развитии оптики океана, — это создание в 60-х годах импульсных лазеров, излучающих короткие мощные импульсы света, что привело к возникновению в гидрооптике целой области исследований — изучение закономерностей формирования нестационарного подводного светового поля и разработка методов лазерного зондирования водной среды.

В настоящем обзоре мы ограничимся кратким рассмотрением трёх основных проблем использования света при освоении морей и океанов: (1) световой режим в водной толще, создаваемый солнечным излучением; (2) подводная видимость при естественном и искусственном освещении, в том числе, через взволнованную морскую поверхность; (3) использо-

вание света для исследования и мониторинга морской среды.

## 2. Световой режим в морской среде, создаваемый солнечным излучением

На первых этапах освоения морей и океанов человечеству был доступен только поверхностный слой, освещаемый солнечным излучением. И в настоящее время, когда человек проникает уже на самые большие океанские глубины, этот слой сохраняет своё наибольшее значение. Для человека по-прежнему наиболее доступно мелководье, прибрежная зона; поверхностный слой также важен тем, что в нем создаётся первичная продукция, это слой фотосинтеза. Биологи называют его «фотическим» (освещённым), и за его нижнюю границу принимается глубина, на которой фотосинтетически активная радиация (ФАР, спектральный диапазон 400–700 нм) составляет 1 % от поверхностной. В наиболее чистых океанских водах толщина фотического слоя может превышать 100 м.

### 2.1. Теоретические оценки распространения солнечного излучения в водной среде

Ниже будем использовать радиометрические величины, которые выражаются в энергетических единицах [7]: поток излучения  $F$ , облучённость  $E$  и энергетическая яркость  $L$ .

Из-за многократного рассеяния весь фотический слой «насыщен» солнечным светом, который приходит в выбранную точку наблюдения со всех направлений; рассматриваемая поверхность не обязательно должна быть реальной (как поверхность моря или дно) — её можно выбрать умозрительно и рассматривать облучённость или яркость для произвольно ориентированной поверхности в любой выбранной точке морской среды.

Оптические свойства морской воды описываются набором оптических характеристик, который включает показатели поглощения  $a(\lambda)$ , рассеяния  $b(\lambda)$ , ослабления  $c(\lambda)$  (сумма показателей рассеяния и поглощения,  $c = b + a$ ) и индикатрису рассеяния  $P(\theta, \lambda)$ , характеризующую угловое распределение однократно рассеянного света. Также используются производные величины: вероятность вы-

живания фотона (в зарубежной терминологии — «альbedo однократного рассеяния»)  $w(\lambda)$ , равная отношению показателей рассеяния и поглощения ( $w = b/c$ ); показатели рассеяния вперёд  $b_f$  (в переднюю полусферу — угол рассеяния  $\theta$  от 0 до  $90^\circ$ ) и назад  $b_b$  ( $\theta$  от  $90^\circ$  до  $180^\circ$ ), коэффициент асимметрии  $K = b_f/b_b$ .

Показатели рассеяния  $b$ ,  $b_f$ ,  $b_b$ , поглощения  $a$  и ослабления  $c$  имеют размерность  $[m^{-1}]$ , индикатриса рассеяния  $P(\theta)$  измеряется в  $sr^{-1}$ , а вероятность выживания фотона  $w$  — величина безразмерная. Точное и полное определение вышеназванных характеристик можно найти в монографиях [8–9].

Важная особенность индикатрисы рассеяния морской воды — её сильная вытянутость в направлении падающего пучка; коэффициент асимметрии, как правило, больше 10, а в некоторых районах — даже больше 100. Эта особенность играет существенную роль в распространении света.

В однородной среде ослабление направленного светового пучка в зависимости от расстояния описывается простой формулой:

$$F(l) = F(0) \cdot \exp(-c \cdot l), \quad (1)$$

где  $F(0)$  — начальная величина потока излучения,  $F(l)$  — величина потока после прохождения в среде расстояния  $l$ . Величина  $cl$  называется оптической толщиной  $\tau$ , а величина  $e^{-c} = F(l)/F(0)$ , соответствующая пропусканию направленного светового пучка слоем единичной толщины, — прозрачностью (обычно измеряется в %).

Формула (1), отражающая экспоненциальный характер ослабления направленного пучка в зависимости от расстояния, называется законом Бугера. С.И. Вавилову удалось показать, что в поглощающей среде закон Бугера справедлив при ослаблении интенсивности падающего светового потока в  $10^{19}$  раз. Однако в рассеивающей среде, какой являются и морская вода, и атмосфера, закон Бугера имеет ограничения — он применим лишь к узконаправленным пучкам и в области, где преобладает однократное рассеяние ( $\tau = c \cdot l \ll 1$ ). При увеличении расстояния от источника излучения в сильно рассеивающей (слабо поглощающей) среде начинает доминировать многократное рассеяние, и вместо закона Бугера для

описания распространения излучения в такой среде приходится использовать уравнение переноса излучения [8].

В самой простой форме уравнение переноса имеет вид:

$$dL/dl = -cL + b \int_{4\pi} L(\theta', \varphi') \cdot P(\theta, \theta') d\Omega', \quad (2)$$

где  $dL/dl$  в левой части уравнения – изменение яркости  $dL$  в рассматриваемом направлении на бесконечно малом отрезке пути  $dl$ ; в правой части первый член показывает уменьшение яркости при однократном взаимодействии со средой (без второго члена формула (2) – это закон Бугера в дифференциальной форме), второй член учитывает увеличение яркости в рассматриваемом направлении за счёт рассеяния излучения, приходящего с других направлений, соответствующих зенитному и азимутальному углам  $\theta', \varphi'$ .

Уравнение (2) – это непростое для решения интегро-дифференциальное уравнение, однако в настоящее время разработаны эффективные численные методы. Описание строгих и различных приближённых методов решения уравнения переноса можно найти в [8].

В числе наиболее применяемых численных методов: метод Монте-Карло, *DISORT*, *Hydrolight*. Преимущество метода Монте-Карло в том, что он применим для любой геометрии эксперимента, условий освещения, пространственного распределения оптических характеристик и т.д.; недостаток – большие затраты машинного времени.

Усовершенствованный метод дискретных ординат *DISORT* (*Discrete Ordinates Radiative Transfer*) реализован в виде компьютерной программы для решения уравнения переноса излучения в плоско-параллельной среде, применимой как для видимого, так и ультрафиолетового, инфракрасного и микроволнового излучения, и широко используется в известных программах расчёта переноса излучения в атмосфере. Обобщение *DISORT* на систему океан-атмосфера с гладкой поверхностью раздела описано в [10], а в [11] используемый подход обобщён на случай взволнованной морской поверхности.

*Hydrolight* – это коммерческая программа численного решения уравнения переноса излучения в плоско-параллельной среде [12]. Она позволяет рассчитывать спектральные распределения яркости на заданной глубине в водной толще как для нисходящего, так и для восходящего потоков излучения с учётом отражения от дна, а также под и над поверхностью моря. В последнем случае для заданного распределения яркости прямого и диффузного излучения, падающего на поверхность, рассчитывается также распределение яркости излучения, отражённого от взволнованной морской поверхности. Другие входные параметры для расчёта – спектральные поглощающие и рассеивающие свойства морской воды с произвольным распределением по глубине, характеристики дна и взволнованной поверхности моря. Детали используемого метода решения уравнения переноса можно найти в книге [13].

Преимущество программы *Hydrolight* перед методом Монте-Карло в том, что вышеуказанные характеристики она считает гораздо быстрее, хотя и с такой же точностью. Разница особенно заметна для яркости восходящего излучения, где для морской воды (из-за сильной вытянутости индикатрисы рассеяния) в методе Монте-Карло, чтобы обеспечить необходимую точность результата, нужно «запускать» очень большое число фотонов ( $10^7$  и больше). Упрощённая версия программы *Hydrolight* под названием *EcoLight* рассчитывает только облучённости и делает это в 30–100 раз быстрее, чем *Hydrolight*.

Ослабление потока солнечного излучения с глубиной приближённо также описывается экспоненциальным законом:

$$E_d(z) = E_d(0^-) \times \exp(-K_d z), \quad (3)$$

где  $E_d(z)$  – облучённость, создаваемая нисходящим потоком солнечного излучения на глубине  $z$ ;  $E_d(0^-)$  – облучённость непосредственно под поверхностью;  $K_d$  – показатель диффузного ослабления нисходящего солнечного излучения (в русской литературе его часто называют показателем вертикального ослабления подводной облучённости сверху).

Если  $K_d$  изменяется с глубиной, то в показателе экспоненты в (3) нужно написать интеграл:

$$E_d(z) = E_d(0^-) \times \exp\left(-\int_0^z K(z) dz\right) \quad (3a)$$

Формулы (3)-(3a) применимы также для облучённости  $E_u(z)$ , создаваемой на глубине  $z$  восходящим потоком солнечного излучения, только вместо показателя  $K_d$  надо использовать показатель  $K_u$  для восходящего солнечного излучения;  $K_u \neq K_d$ . Оба показателя зависят как от оптических свойств морской воды (в первую очередь, от показателей поглощения и рассеяния назад), так и от угловой структуры нисходящего и/или восходящего световых потоков.

Для показателя  $K_d$  можно использовать приближённую формулу [14]:

$$K_d = 1.04 D_0 (a + b_b), \quad (4)$$

где  $D_0 = (1 - g) / \cos \theta_{0w} + 1,197g$ ,  $a$  и  $b_b$  – показатели поглощения и рассеяния назад;  $\theta_{0w}$  – угол преломления прямых солнечных лучей,  $g$  – доля диффузного излучения в общем потоке излучения, падающего на поверхность. Все величины здесь и далее – функции длины волны излучения  $\lambda$ .

Величина  $g$  близка к 0 для случая чистой атмосферы и Солнца в зените и равна 1 при отсутствии прямых солнечных лучей в случае облачности или «пылевой бури». В первом случае  $D_0 = 1$ , во втором она равна 1,197. Наибольшее значение  $D_0$  соответствует случаю чистой атмосферы при максимально возможном угле преломления прямых солнечных лучей  $\theta_{0w} = 48,3^\circ$ ; значение  $D_0$  в этом случае близко к 1,5.

Видно, что, вообще говоря, величина  $K_d$  существенно зависит от высоты Солнца и состояния атмосферы. Тем не менее, если принять  $D_0 = 1,2$  и пренебречь в (4) величиной  $b_b$  по сравнению с  $a$  (что вполне допустимо для большинства морских и океанских вод), то полученная приближённая формула для расчёта  $K_d$  оказывается пригодной для большинства случаев:  $K_d \cong 1,25 \cdot a$ .

На рис. 1 представлены среднемесячные пространственные распределения показателя диффузного ослабления подводной облучённости  $K_d(490)$  для длины волны 490 нм

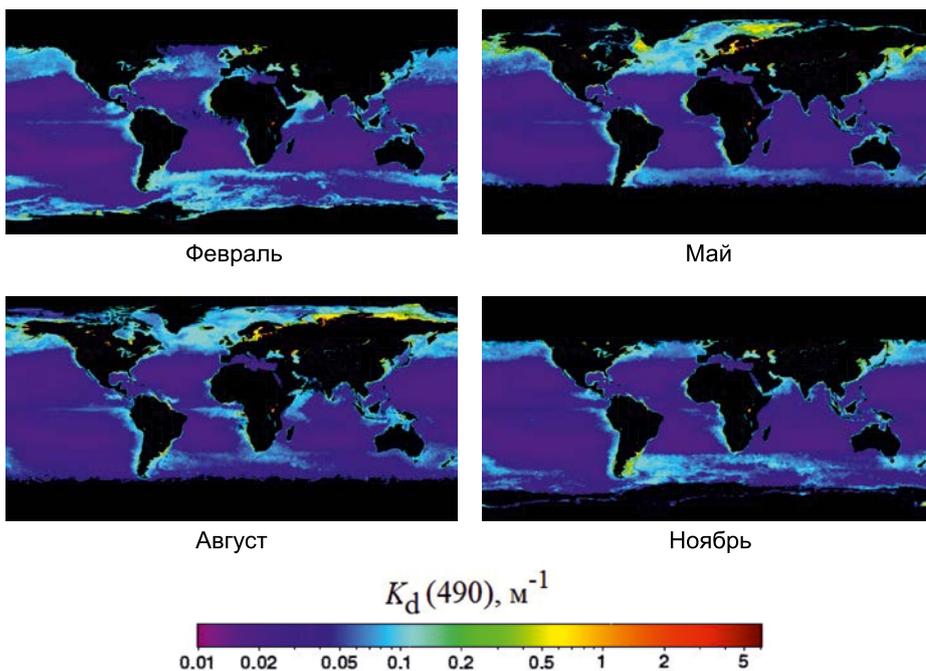


Рис. 1. Среднемесячные пространственные распределения показателя диффузного ослабления подводной облучённости  $K_d(490)$  по данным спутникового сканера цвета VIIRS, усреднённым за период 2012–2016 гг.

для февраля, мая, августа и ноября по данным спутникового сканера цвета VIIRS, усреднённым за период 2012–2016 гг. [15]. Видно, что эта величина, в зависимости от района, изменяется очень сильно – от  $\sim 0,01 \text{ м}^{-1}$  до нескольких единиц; кроме того, её значения подвержены заметным сезонным изменениям.

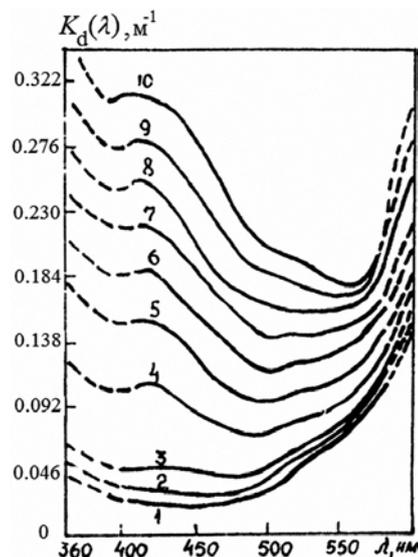


Рис. 2. Спектральные зависимости показателя диффузного ослабления подводной облучённости  $K_d(\lambda)$  в зависимости от величины  $K_d(500)$ . Цифры у кривых соответствуют следующим значениям  $K_d(500)$ : 1–0,028; 2–0,034; 3–0,046; 4–0,069; 5–0,092; 6–0,115; 7–0,138; 8–0,161; 9–0,184; 10–0,207  $\text{м}^{-1}$  (значения пересчитаны по данным [8, с.276])

## 2.2. Спектральные распределения подводной облучённости и предельные глубины проникновения солнечного излучения

Показатель диффузного ослабления  $K_d$  зависит от длины волны излучения  $\lambda$ , и эта зависимость в видимом диапазоне спектра выражена довольно резко (рис. 2) [8, с.276]. При этом  $K_d(500)$  зависит от абсолютного значения показателя поглощения, и, как видно на рис. 2, соответствующие разным значениям показателя поглощения зависимости  $K_d(\lambda)$  наиболее резко отличаются друг от друга в коротковолновой части спектра. Эти изменения связаны, в первую очередь, с изменением содержания окрашенного органического вещества в разных водах.

В соответствии с (2), изменения спектральных величин  $K_d(\lambda)$  приводят к изменению с глубиной спектрального распределения подводной облучённости  $E_d(1, z)$ , и это изменение происходит по-разному в различных типах вод [8, с.269]. На рис. 3 видно, что вода действует как цветной фильтр: непосредственно под поверхностью (на глубине 0 м) спектральное распределение облучённости соответствует солнечному спектру, а с глубиной это распределение сужается в зависимости от спектральной зависимости

показателя  $K_d(\lambda)$ . Общим свойством всех типов морской воды является сильное ослабление с глубиной красного участка спектра, обусловленное поглощением самой водой. Исчезновение красного света из распространяющегося вглубь моря светового потока может привести к неожиданным цветовым эффектам под водой. Один из таких эффектов красочно описан в книге [16], когда один акванавт на глубине нескольких десятков метров ранил гарпуном большую рыбу – лихию: «Кровь была зелёная! Ошеломлённый этим зрелищем, я подплыл ближе, глядя на струю, вместе с которой из сердца рыбы уходила жизнь. Она была изумрудного цвета. Мы недоумевающе переглянулись. Сколько раз мы плавали среди лихий, но никогда не подозревали, что у них зелёная кровь. Крепко держа гарпун со своим поразительным трофеем, Диди пошёл вверх. На глубине пятидесяти пяти футов кровь стала коричневой. Двадцать футов – она уже розовая, а на поверхности растеклась алыми струями».

Разница в абсолютных значениях показателя  $K_d$  приводит к резкому различию изменения светового режима с глубиной. В чистых океанских водах в максимуме пропускания величина  $E_d$  уменьшается на порядок примерно на глубине 100 м, а в мутных прибрежных водах – примерно на 3 порядка уже на глубине 50 м (рис. 3).

Многие исследователи задавались вопросом: а на какой глубине в море вообще исчезает солнечный свет? Подобную задачу, в частности, рассматривал Пьер Бугер, который при этом считал, что солнце становится полностью невидимым, если его свет ослабить в 900 млрд раз. Простые оценки показывают, что в чистых океанских водах такое ослабление произойдёт примерно на глубине 600 м.

Современные приёмники света – фотоэлектронные умножители, способные улавливать даже отдельные фотоны, на глубине 1000 м в прозрачных водах будут регистрировать попадание примерно одного фотона в секунду. Глубины 1200 м достигнет лишь один фотон из каждых  $10^{24}$ , падающих на поверхность моря; здесь чувствительный фотоумножитель фиксировал бы попадание фотона примерно один раз в сутки; на глубине 1500 м – один раз в 300 лет! Попадание фотона солнечного света на дно

Марианской впадины вряд ли произойдёт хотя бы один раз за всю историю человечества.

### 2.3. Измерение параметров солнечного излучения на поверхности моря и в водной толще

В предыдущих разделах было показано, что в настоящее время теоретические расчёты светового режима в морской среде могут обеспечить достаточно надёжные результаты при условии, что известны оптические характеристики морской воды и условия освещения. Конечно, вообще обойтись без прямых измерений параметров светового поля невозможно — по крайней мере, они необходимы для проверки правильности различных теоретических моделей. Однако измерения этих параметров в условиях морских экспедиций обычно связаны со значительными трудностями — на наш взгляд, измерять оптические характеристики морской воды проще и надёжнее (их, по крайней мере, можно измерять в лаборатории, в отличие от параметров световых полей).

Сложности измерений связаны, в первую очередь, с погодными условиями — облачностью, качкой, поверхностным волнением. Последнее создаёт высокочастотные флуктуации подводной облучённости, которые при обработке данных необходимо отделять от средних величин. Анализ технических трудностей измерения параметров световых полей можно найти в [8, гл. 9]; там же описаны приборы, разработанные до начала 80-х годов прошлого столетия. В настоящем обзоре мы приведём примеры современных разработок (и-за ограниченности объёма — только измерителей облучённости).

В Институте океанологии РАН (ИО РАН) в последние годы для измерений облучённости сверху ( $E_d$ ) и снизу ( $E_u$ ) используется измеритель светового режима (ИСП) [17]. Он был создан для измерения поверхностной и подводной облучённости на основе 4-канальных радиометров, разработанных американской компанией *Biospherical Instruments Inc.* Измерительный комплекс включает два датчика, каждый из которых обеспечивает измерение облучённости в спектральных каналах 443, 490, 555 и 625 нм (полуширина 10 нм) с погрешностью

Рис. 3. Изменение с глубиной спектральных распределений подводной облучённости  $E_d(\lambda)$  в разных водах: а – Саргассово море, б – вблизи Сенегала. Цифры у кривых – горизонты, м [8, с.269]

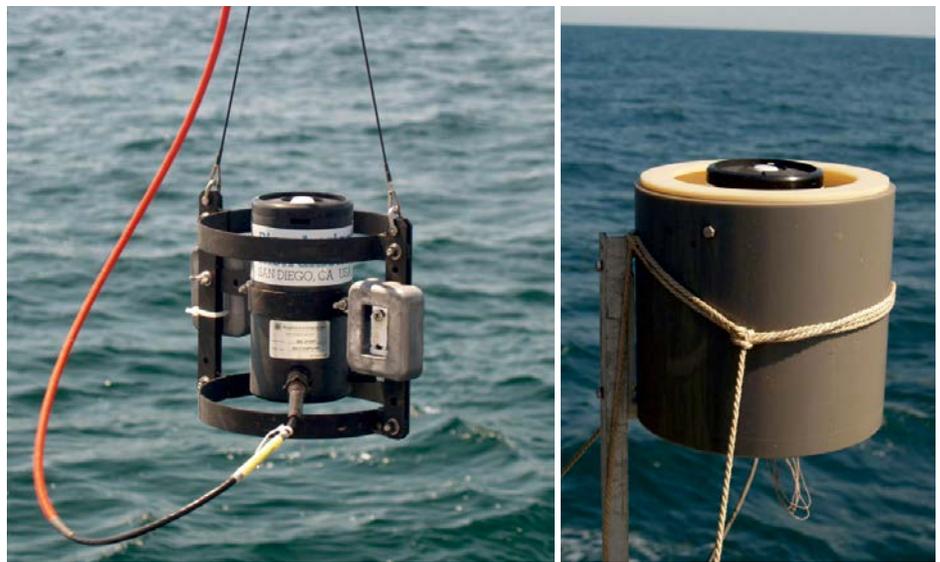
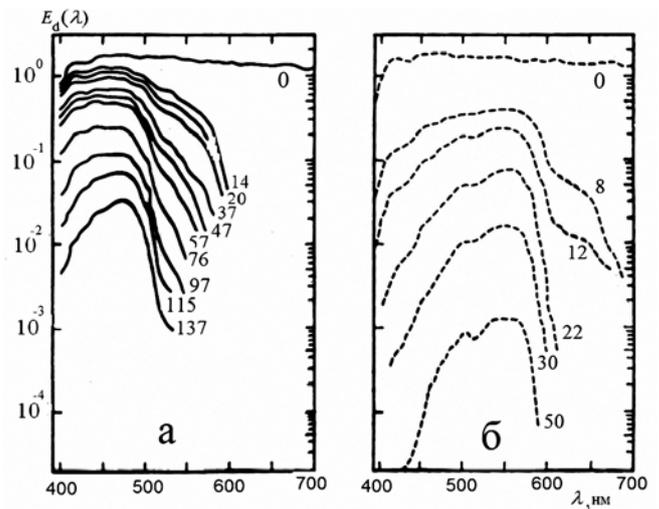


Рис. 4. Измеритель светового режима на поверхности моря и в водной толще. Слева – погружаемый датчик, справа – палубный датчик

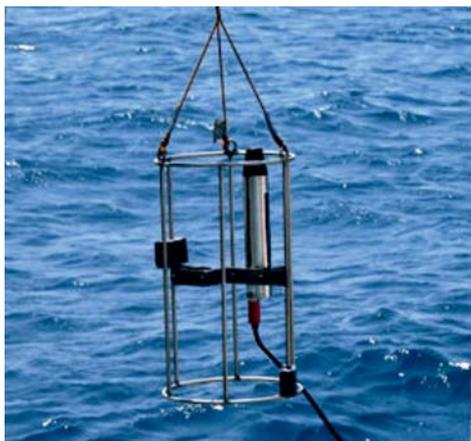
не более 5 % (рис. 4). Специальный косинусный коллектор обеспечивает косинусность с точностью  $\pm 2\%$  и  $\pm 10\%$  в диапазонах углов  $0-65^\circ$  и  $65-85^\circ$  соответственно.

Палубный спектро радиометр (рис. 4) устанавливается в незатенённом месте на палубе судна и снабжён «стабилизатором вертикали», чтобы исключить влияние качки на измеряемые величины облучённости. На переходах судна с палубного модуля выполнялась непрерывная регистрация спектральной поверхностной облучённости на 4-х длинах волн в течение всего светлого времени суток. Динамический диапазон палубного датчика  $10^{-2} - 30 \text{ Вт/м}^2$ .

Подводный радиометр погружается с борта судна на кабеле в кевларовой оплётке на глубину до 100 м; динамический диапазон измерений об-

лучённости —  $10^{-4} - 30 \text{ Вт/м}^2$ . Прибор снабжён датчиками глубины и температуры воды. Измерения подводным модулем могут проводиться как в режиме непрерывного зондирования, так и на фиксированных горизонтах. Частота опроса каналов облучённости в режиме зондирования — 5 Гц, в режиме выборки — с интервалом  $1 \div 60$  мин. Для измерения подводной облучённости снизу  $E_u$  и определения коэффициента диффузного ослабления  $K_u$ , подводный модуль превращается в коллектор вниз. С помощью разработанного вспомогательного модуля, устанавливаемого на корпусе подводного радиометра, обеспечивается возможность измерений в автономном режиме без кабеля.

Были разработаны алгоритмы и подготовлено соответствующее программное обеспечение для расчёта



#### Технические характеристики:

- Динамический диапазон канала измерения облучённости  $3 \pm 0,0003 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{нм}$ .
  - Спектральный диапазон измерений –  $320 \pm 1100 \text{ нм}$ .
  - Разрешение по спектру –  $3 \text{ нм}$ .
  - Максимальная глубина погружения (по длине кабеля) –  $100 \text{ м}$ .
  - Время выборки усреднённого спектра (задается оператором) –  $0,1 \text{ с} \pm 24 \text{ ч}$ .
- Прибор откалиброван 26.01.2015 компанией *TRIOS* по стандартам *NIST*.

Рис. 5. Гиперспектральный радиометр *RAMSES*, разработка компании *TRIOS* [19]

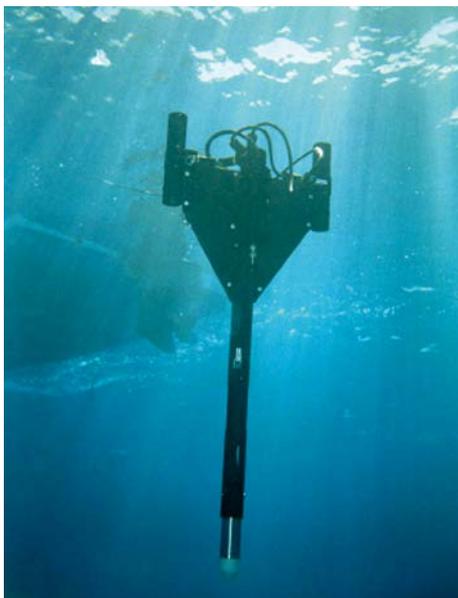


Рис. 6. Измерительная система *Profiler II*, разработанная компанией *SATLANTIC* [20], для измерения яркости восходящего излучения и облучённости сверху в 8 спектральных каналах. Слева – модификация для измерений в «буйковом» варианте, справа – измерения в режиме «свободного падения»

спектральных величин поверхностной облучённости ([18]) и спектральных коэффициентов диффузного отражения [17].

В ИО РАН также используется гиперспектральный радиометр *RAMSES*, разработанный немецкой компанией *TRIOS* (рис. 5). Измерения этим прибором проводятся на дискретных горизонтах, а глубина определяется с помощью встроенного датчика глубины. Для измерения подводной облучённости снизу  $E_u$  подводный модуль переворачивается коллектором вниз. Более подробную информацию об этом приборе можно найти на сайте компании *TRIOS* [19].

Интересную систему для измерения яркости восходящего излучения и облучённости сверху в 8 спектраль-

ных каналах предлагает американская компания *Satlantic* [20] (рис. 6). Возможны две модификации: «буйковый» вариант и свободно падающая платформа (чтобы изолировать устройство от движений судна, которые могут приводить к искажению данных). Для работы в «буйковом» варианте устанавливается съёмный поплавок (рис. 6); в таком варианте измерения яркости и облучённости могут выполняться непосредственно под поверхностью моря (лишь на 5 см ниже поверхности).

При работе в режиме «свободного падения» поплавок снимается, и зонд измеряет вертикальные профили вышеуказанных (или других) характеристик, опускаясь вниз под действием собственной тяжести. На зонде, наря-

ду с измерителями яркости и облучённости, могут устанавливаться и другие датчики: температуры и электропроводности, глубины, угла наклона, флуоресценции и рассеяния света.

### 3. Подводная видимость при естественном и искусственном освещении

Наблюдение подводных объектов – одно из важнейших направлений освоения и изучения Мирового океана, и для его практической реализации разрабатываются и создаются различные системы наблюдения – судовые, на подводных носителях, авиационные, спутниковые. Теория подводного видения основана на теории переноса излучения, но имеет свою специфику. В настоящее время опубликованы и книги, и обзорные статьи, в которых суммированы основные положения современной теории видения, описываются методы расчёта параметров изображения, дальности видимости и разрешающей способности различных систем видения при естественном и искусственном освещении [21, 22]. В 2006 г. опубликована первая в мире монография по теории видения через взволнованную морскую поверхность [23]. Вышеуказанные публикации содержат практически все важные библиографические ссылки, и читатель, интересующийся вопросами подводного видения, сможет найти в них изложение различных аспектов проблемы. В нашем обзоре мы приведём лишь два интересных примера, один из которых относится к проблеме улучшения качества изображения при наблюдении подводного объекта через взволнованную водную поверхность, а другой иллюстрирует современные возможности подводного видения на самых больших океанских глубинах.

#### 3.1. Коррекция изображений подводных объектов, искажённых поверхностным волнением

Взволнованную ветровым воздействием поверхность моря можно представить как состоящую из отдельных элементарных площадок, имеющих случайный наклон. Излучение, отражённое от подводного объекта, при прохождении через поверхность преломляется на таких площадках

и существенно искажается. Эту проблему можно частично решить путём усреднения (накопления) большого количества изображений при условии, что время накопления значительно превышает максимальный период волнения. Однако в реальных авиационных системах видения с большой скоростью движения такое усреднение невозможно, и приходится иметь дело с «мгновенными» изображениями. Пример искажения мгновенного изображения самосветящейся миры через взволнованную поверхность воды в лабораторном бассейне (выдержка 1/400 с) показан на рис. 7.

Идея коррекции искажённого мгновенного изображения основана на использовании информации о пространственном распределении уклонов. В эксперименте [24], результаты которого представлены на рис. 7, такая информация получалась из бликовой картины взволнованной поверхности, освещаемой широким параллельным пучком (при известном направлении и угле падения). Поверхность освещалась красным светом, а объект — зелёным. Обработка бликовой картины позволила получить значение уклонов в окрестности зеркальных точек в области поверхности, ответственной за искажение изображения. Для каждого мгновенного изображения полученная информация использовалась для коррекции отдельных фрагментов изображения, а коррекция всего изображения осуществлялась путём суммирования (накопления) серии частично скорректированных мгновенных изображений. Результат выполненной коррекции, представленный на рис. 7в, наглядно демонстрирует принципиальную возможность коррекции изображений, искажённых поверхностным ветровым волнением.

### 3.2. Проведение глубоководных наблюдений с помощью обитаемых аппаратов

В ИО РАН эксплуатируются два глубоководных обитаемых аппарата (ГОА): «Мир-1» и «Мир-2» с глубиной погружения до 6 км [25]. Аппараты оснащены мощными подводными светильниками (рис. 8), обеспечивающими возможность визуальных наблюдений подводных объектов, фото- кино- и телевизионных съёмок. С помощью аппаратов «Мир»

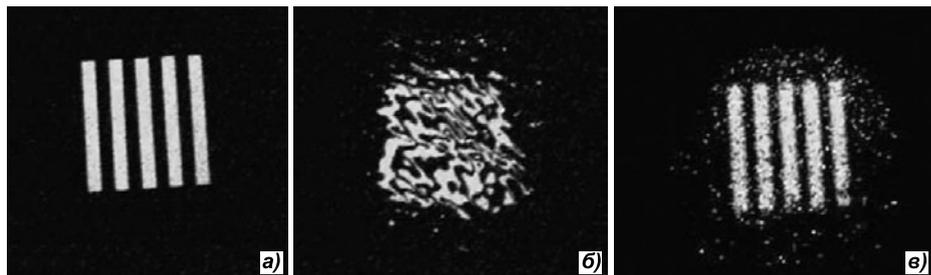


Рис. 7. Изображения самосветящейся миры через поверхность воды в лабораторном бассейне. а – исходное изображение через гладкую поверхность, б – изображение через взволнованную поверхность (выдержка 1/400 с), в – восстановленное изображение [24]

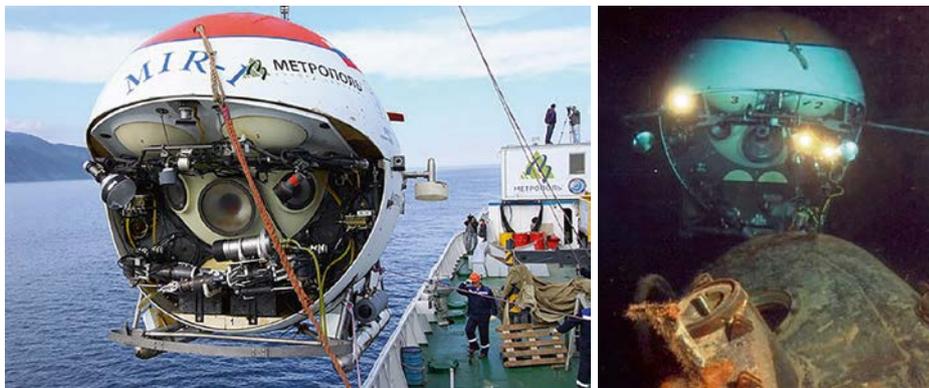


Рис. 8. Глубоководный обитаемый аппарат «Мир»: слева – перед спуском, справа – обследование затонувшей подводной лодки, Атлантический океан, глубина 5400 м

сделаны важные научные открытия, а также проведены обследование и видеосъёмки на 6 объектах, затонувших на глубине до 5400 м. В 1991 и 1995 гг. с помощью аппаратов «Мир» производились съёмки кинофильмов на легендарном затонувшем судне «Титаник», лежащем на глубине 3800 м. В процессе погружений обследован корпус «Титаника», который во время аварии развалился на две части, лежащие на расстоянии 600 м друг от друга, проведены уникальные киносъёмки. В результате работ были созданы широкоформатный фильм *IMAX «TITANICA»* и всемирно известный голливудский художественный фильм «TITANIC». Была реализована методика прямой телевизионной трансляции пакета видеосигналов с глубины 3800 м по оптоволоконному кабелю на поверхность океана и далее через спутник на землю. Такая операция проводилась трижды, и во время одной из них передачу с «Титаника» весь мир смотрел в течение 2,5 часов по каналу *Discovery*.

С помощью ГОА «Мир» созданы и другие известные фильмы: «Bismarck», «Aliens of the Deep», «Ghost of the Abyss» и др.

Уникальные научные исследования были проведены в экспедиции

на озере Байкал в июле-августе 2008 г. Аппараты «Мир» совершили 52 погружения. В них принимали участие учёные, которым удалось обнаружить нефтеносные породы, сейсмогенные грунты, новые микроорганизмы.

Аппараты «Мир» с учёными на борту погружались на гидротермальные поля Атлантического и Тихого океанов. При этом был получен большой объём уникальных научных данных, позволивший оценить масштабы мировой гидротермальной системы, депозиты рудных образований в отдельных районах, изучить их химический состав, исследовать биоразнообразие гидротермальных систем и т.д.

### 4. Использование света для исследования и мониторинга морской среды

Использование света для исследования и мониторинга морской среды имеет важные достоинства, а по некоторым направлениям и явные преимущества, по сравнению с другими методами. В их числе: возможность проводить исследования без «насилия» над исследуемой средой, практическая безынерционность, высокое пространственное разрешение, потенциально большие объём

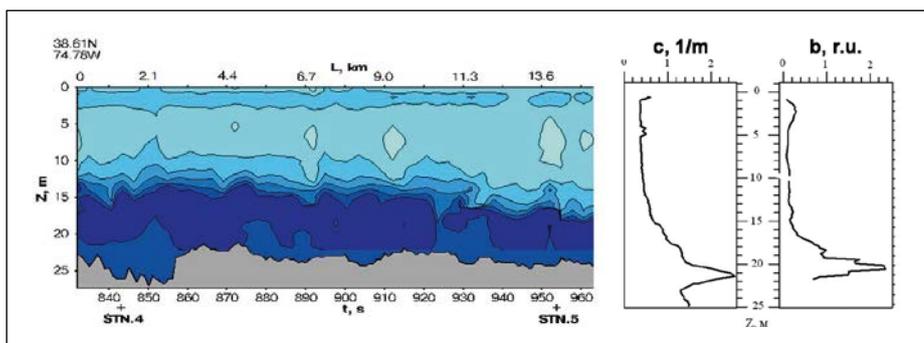


Рис. 9. Измерения с помощью авиационного лидара ИО РАН. Слева – пространственное распределение взвешенного вещества (отн.ед.) по данным авиационной лидарной съёмки над мелководным атлантическим шельфом вблизи восточного побережья США. (По вертикали – глубина в метрах, также рассчитанная по данным поляризационного лидара. Представлен 16-километровый участок разреза. На нижней шкале время в секундах. Крестиками (+) показано положение станций 4 и 5, на которых выполнялись контрольные оптические измерения.) Справа: результаты сравнения вертикальных профилей: рассчитанного по данным лидара (справа) и измеренного *in situ* (слева) с придонным нефелоидным слоем на глубине « 21 м

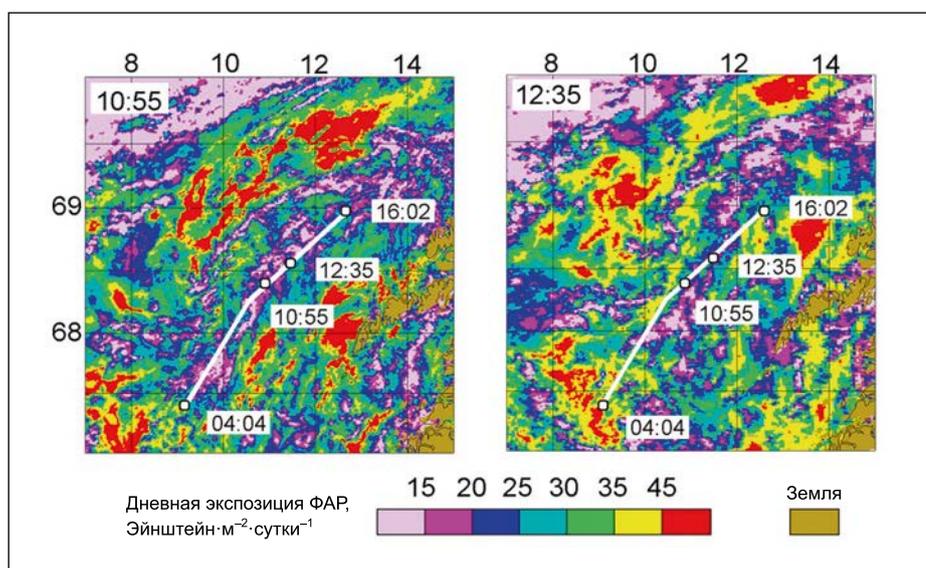


Рис. 10. Сравнение пространственных распределений дневной экспозиции фотосинтетически активной радиации (400–700 нм), рассчитанных по данным спутникового сканера MODIS-Aqua с помощью алгоритма ИО РАН 1 августа 2014 г. в 10:55 GMT (слева) и 12:35 GMT (справа). Белая линия показывает маршрут движения судна, а цифры рядом – начало (04:04) и конец (16:02) судовых измерений ФАР, а также положение судна во время пролёта спутника [31]

и разнообразие получаемой информации. Для исследования пространственного распределения взвеси, фитопланктона, окрашенного органического вещества, изучения гидродинамических процессов широко используются оптические зонды (прозрачнотомы, нефелометры, флуориметры).

Свет (в отличие от микроволнового излучения и звука) проходит через морскую поверхность с малыми потерями, что даёт возможность проводить исследования подповерхностного слоя океана дистанционно (с борта судна, самолёта, спутников).

#### 4.1 Использование лазерного излучения

С начала 70-х годов прошлого века в специализированных рейсах ИО РАН проводились натурные эксперименты по исследованию закономерностей распространения импульсного лазерного излучения в океанских водах и возможностей использования лазерных импульсов для зондирования водной среды. Выяснилось, что лазерные пучки могут достаточно глубоко проникать в водную толщу: в одном из экспериментов в чистых океанских водах, выполненном с по-

мощью специально разработанной подводной скамьи, лазерный сигнал, посланный с борта научно-исследовательского судна, удалось зарегистрировать на глубине более 300 м; ослабление облучённости относительно поверхностной составило 11 порядков.

Для определения характеристик вод поверхностного слоя начали использовать лидары (*Lidar – Light Detection and Ranging*). Они разрабатывались одновременно по двум направлениям: так называемые «временные» лидары и флуоресцентные лидары. Первые основаны на измерении и последующей обработке временной зависимости «эхо-сигнала», формирующегося в результате обратного рассеяния зондирующего импульса, распространяющегося в водной толще; приоритетные исследования в этом направлении в СССР были выполнены специалистами Института физики в Минске и Института прикладной физики в Нижнем Новгороде. Вторые основаны на измерении и анализе спектральных характеристик импульса обратного рассеяния, которые обусловлены количественным и качественным составом флуоресцирующих компонент морской воды и комбинационным (рамановским) рассеянием – здесь приоритет принадлежит специалистам МГУ. Информацию о лидарных методах исследования структуры верхнего слоя океана с авианосителей можно найти в обзоре [26].

На рис. 9 приведён пример измерений с помощью авиационного поляризационного лидара АПЛ, разработанного в ИО РАН. Измерения были выполнены во время российско-американского лидарного эксперимента с самолета-лаборатории НАСА в 1996 г. [27]. Одновременно с авиационными измерениями выполнялись прямые определения вертикальной структуры с борта судна; как видно на рис. 9, имеет место совпадение вертикальных профилей, и очень неплохое. Подобные измерения выполнялись также с борта судна с помощью судового варианта поляризационного лидара [28].

Измерения с помощью АПЛ позволяют также рассчитать значения показателя диффузного ослабления подводной облучённости  $K_d$  в подповерхностном слое моря и постро-

### Основные характеристики океана и атмосферы, рассчитываемые по данным спутниковых сканеров цвета [30]

Параметр	Использование
Спектральный коэффициент яркости водной толщи	Индикатор процессов, происходящих в поверхностном слое (таких как распространение речных стоков, примесей различного происхождения, мезомасштабные вихри, фронтальные зоны и т.п.)
Концентрация хлорофилла	Характеризует биомассу фитопланктона; ключевой параметр для расчёта первичной продукции океанов и морей
Характеристики атмосферного аэрозоля	Влияют на пропускание солнечной и уходящей радиации, а также на микрофизику облаков
Параметры облаков	Важнейший метеорологический фактор
Спектральная облучённость поверхности	Важный фактор, определяющий первичную продукцию и тепловой баланс океана
Показатель вертикального ослабления подводной облучённости	Ключевая характеристика для расчёта светового режима в водной толще, альбедо океана и объёмного поглощения солнечной энергии в поверхностном слое
Первичная продукция	Характеризует биоресурсы океана, влияет на глобальные потоки углерода в системе атмосфера—океан
Показатель поглощения окрашенного органического вещества	Определяет поглощение света в воде, характеризует содержание окрашенной органики и качество воды в прибрежной зоне; один из параметров мониторинга
Показатель рассеяния морской взвеси	Определяет альбедо водной толщи, характеризует содержание взвеси в воде; один из параметров мониторинга

ит его пространственное распределение [29].

#### 4.2 Спутниковые наблюдения цвета океана

Первый спутниковый сканер цвета океан был запущен в 1978 г. на спутнике *NIMBUS-7* и за почти 8 лет своей работы на орбите дал огромное количество информации о количественных характеристиках цвета различных морей и океанов в зависимости от биопродуктивности вод и других факторов. В настоящее время спутниковые сканеры цвета, использующие солнечное излучение и не нуждающиеся в активных источниках, обеспечивают информацию о динамических процессах в поверхностном слое (в частности, о распространении речных стоков), позволяют оценить концентрацию хлорофилла и световой режим в водной толще, содержание взвеси и окрашенной органики, качество воды в прибрежной зоне и др. (см. табл. 1 [30]).

На рис. 10 показаны пространственные распределения дневной экс-

позиции фотосинтетически активной радиации (400–700 нм), рассчитанные по данным спутникового сканера *MODIS-Aqua* с помощью алгоритма ИО РАН [18]. В цитируемой работе сравниваются результаты расчётов по алгоритму ИО РАН [31] и стандартному алгоритму НАСА [32] с результатами непрерывных (каждые 10 мин) судовых измерений посредством ИСП (см. раздел 1.3), проведённых во время экспедиции научно-исследовательского судна «Профессор Штокман» по маршруту из Калининграда в Архангельска в конце июля – начале августа 2014 г. Результаты выполненного сравнения показали, что оба алгоритма обеспечивают вполне приемлемую точность оценок, проведённых применительно к 1 суткам и 100 км<sup>2</sup>: при отсутствии резких изменений в облачности ошибки составляют 5–35 % для алгоритма НАСА и 2–22 % для алгоритма ИО РАН. Отметим, что алгоритм ИО РАН даёт возможность оценивать не только поверхностную, но и подводную облучённость на различных глубинах в подповерхностном слое [33].

Благодаря современным техническим достижениям, открываются новые возможности для использования света при освоении и исследовании морей и океанов. Запускаются новые сканеры цвета, имеющие улучшенные спектральные характеристики и более высокое пространственное разрешение; ещё не освоены возможности беспилотных летательных аппаратов для исследования и мониторинга подповерхностного слоя морей и прибрежных районов океана. Рассматриваются возможности создания подводных лидаров, которые позволяют осуществлять оптическое дистанционное зондирование внутри морской среды. Человек уже опускался на дно Марианской впадины, а глубоководные обитаемые аппараты работают на глубинах 6 км. Сейчас уже созданы подводные планёры – глайдеры – с дальностью автономного плавания в тысячи километров, на которых тоже могут устанавливаться оптические измерители. Эра освоения морей и океанов с использованием света продолжается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. 972 с.
2. Гершун А.А. Очерк по истории фотометрии / Избранные труды по фотометрии и светотехнике. М.: Гос. изд-во физ. – мат. литературы, 1958. С. 9–48.
3. Березкин В.А., Гершун А.А., Янишевский Ю.Д. Прозрачность и цвет моря / Л.: Изд. ВМА ВМФ, 1941.
4. Гершун А.А. Избранные труды по фотометрии и светотехнике. М.: Гос. изд-во физ. – мат. л-ры, 1958. 548 с.
5. Raman, C.V. On the molecular scattering of light in water and the colour of the sea. // Proc. R. Soc. London, Ser. A. – 1922. – Vol.101. – P. 64–79.
6. Шулейкин В. О цветности моря // Известия Института физики и биофизики. – 1922. – Т. 2. – С. 119–136.
7. ГОСТ 7601–78 Физическая оптика. Госстандарт СССР. 1979. С. 27.
8. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / М.: Наука, 1983. 372 с.
9. Шифрин К.С. Введение в оптику океана / Л.: Гидрометеиздат, 1983. 278 с.
10. Jin, Z., Stamnes, K. Radiative transfer in nonuniformly refracting layered media:

atmosphere-ocean system // Appl. Optics. — 1994. — Vol. 33. — P. 431–442.

11. *Sheberstov, S.V., Nabiullina, M.V., Lukianova, E.A.* Numerical Modelling of Radiative Transfer in Ocean-Atmosphere system with wind-roughened surface // Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters». St. Petersburg. 2003. P. 9095.

12. HYDROLIGHT 5.2 ECOLIGHT 5.2 — Sequoia Scientific [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sequoiasci.com/wp-content/uploads/2013/07/HE52Users-Guide.pdf>.

13. *Mobley, C.D.* Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters / San Diego: Academic Press, 1994. 592 pp.

14. *Gordon, H.R.* Can the Lambert–Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? // Limnol. Oceanogr. — 1989. — Vol.34. No. 8. — P. 1389–1409.

15. OceanColorWeb // Data — Level 3 Browser [Электронный ресурс]. URL: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>.

16. *Кусто Ж. — И., Дюма Ф.* В мире безмолвия / М.: Молодая гвардия, 1957. 224 с.

17. *Khrapko, A.N., Kopelevich, O.V., Burenkov, V.I. et al.* New instrument for measuring surface and underwater irradiances // Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW '2007). Nizhnii Novgorod 2007. P. 271–275.

18. *Vazyulya, S.V., Kopelevich, O.V., Sheberstov, S.V., Artemiev, V.A.* Estimation of sea surface solar radiation at 400–700 nm using satellite ocean color data, and its validation by ship data // Optics Express. — 2016. — Vol 24, No. 6. — P. A604–A611.

19. RAMSES Hyperspectral Radiance and Irradiance Sensors / ramses\_en.pdf. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.trios.de>.

20. Free-Falling Optical Profiler [Электронный ресурс]. URL: <http://satlantic.com/profiler>.

21. *Долин Л.С., Левин И.М.* Справочник по теории подводного видения / Л.: Гидрометеиздат. 1991. 229 с.

22. *Долин Л.С., Левин И.М.* Теория подводной видимости // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2015. — Т. 8, № 2. — С. 22–35.

23. *Dolin, L.S., Gilbert, G.D., Levin, I.M., Luchinin, A.G.* Theory of imaging through wavy sea surface / N. Novgorod: Institute of Applied Physics. 2006. 180 pp.

24. *Савченко В.В., Осадчий В.Ю., Левин И.М.* Коррекция изображений подводных объектов, искажённых поверхностным волнением // Океанология. — 2008. — Т. 48, № 6. — С. 843–846.

25. Ocean.Ru — Лаборатория научной эксплуатации... [Электронный ресурс]. URL: <http://ocean.ru/content/view/52/45/>.

26. *Гольдин Ю.А., Лучинин А.Г.* Авиационные лидарные методы исследования вертикальной структуры оптических характеристик верхнего слоя океана // В: Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. Т. 2, С. 345–381.

27. *Vasilkov, A.P., Goldin, Yu.A., Gureev, B.A. et al.* Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean // Applied Optics. — 2001. — Vol. 40, No. 24. — P. 4353–4364.

28. *Гольдин Ю.А., Гуреев Б.А., Венцкун Ю.И.* Поляризационный лидар для зондирования толщи океанских вод с борта судна / В: Комплексные исследования Мирового океана — проект «Меридиан, Атлантический океан». М.: Наука, 2008. С. 179–188.

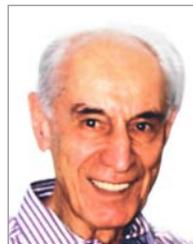
29. *Goldin, Y.A., Vasilev, A.N., Lisovskiy, A.S., Chernook, V.I.* Results of Barents Sea airborne lidar survey // Proc. SPIE. — 2007. — Vol. 6615, 66150E.

30. *Копелевич О.В.* Оптические свойства вод океанов и морей // В: Мировой океан. Т. 2. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. М.: Научный мир, 2014. С. 58–82.

31. *Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В. и др.* Оценка баланса ФАР в Баренцевом море по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS // Океанология. — 2003. — № 6 ю — С. 834–845.

32. NASA, «OceanColourWEB». [Электронный ресурс]. URL: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.

33. *Kopelevich, O.V., Sheberstov, S.V., Burenkov, V.I. et al.* Assessment of underwater irradiance and absorption of solar radiation at water column from satellite data // Proc. SPIE. — 2007. — Vol. 6615, 661507.



**Копелевич Олег Викторович,**

Доктор физ.-мат. наук. Окончил в 1965 г. Московский физико-технический институт. Заведующий лабораторией

оптики океана Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

## В США испытали чрезвычайно мощный боевой лазер

Специалисты американской компании *Lockheed Martin* осуществили испытания боевого лазера, проектная мощность которого составляет 60 кВт. Это один из мощнейших лазерных комплексов, существующих на данный момент.



В лазере единый луч образуется множеством более тонких лазерных лучей, распространяющихся в оптоволоконных каналах. Само устройство довольно увесисто и габаритно, но без проблем устанавливается на какой-нибудь бронированный армейский грузовик.

Совсем недавно в Персидском заливе ВМС США проводили испытания аналогичной лазерной установки (вполовину менее мощной), установленной на одном из своих кораблей. Морская версия лазерной системы требует наличия большой батареи и совсем не годится для использования в наземных мобильных целях. Новая разработка *Lockheed*, в свою очередь, получилась более компактной, лёгкой, и в то же время более мощной, по сравнению со всем остальным, что когда-либо использовалось армией США.

Такое оружие изначально и не подразумевалось для использования против людей, несмотря на то, что множество фантастических фильмов может говорить об обратном. Задачей подобных лазерных систем в первую очередь служит защита границ и территорий от компактных летательных аппаратов, дронов, а также ракет. Наступательные возможности у таких систем в перспективе тоже имеются, но такое использование их пока представляется весьма непрактичным.

<https://e.mail.ru/>  
19.03.2017