

## Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения

© 2015 М.Е. Ли, Е.Б. Шибанов, Е.Н. Корчёмкина, О.В. Мартынов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
E-mail: michael.lee.mhi@gmail.com*

Поступила 23.07.2015 г. После доработки 17.08.2015 г.

Рассматриваются результаты измерений спектрального коэффициента яркости моря, выполненных в 2002 – 2014 гг. на океанографической платформе Экспериментального отделения МГИ при помощи разработанного в отделе оптики моря спектрофотометра. Специальная методика измерений позволяет учесть свет, отраженный водой, что в свою очередь избавляет от необходимости проводить контактные измерения под морской поверхностью. Алгоритм обработки полученных данных дает возможность рассчитывать такие первичные гидрооптические характеристики морской воды, как концентрация пигментов фитопланктона, поглощение неживой органикой и рассеяние взвесью, а также определять наличие вспомогательных фотосинтетических пигментов по восстановленному спектру поглощения фитопланктона. Рассматриваемый метод позволяет проводить оперативный спутниковый мониторинг состояния морской среды, в частности с целью валидации алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования.

**Ключевые слова:** коэффициент яркости моря, спектрофотометр, хлорофилл *a*, минеральная взвесь, кокколитофориды, пигменты фитопланктона.

**Введение.** Для глобальной оценки продуктивности и содержания примесей в поверхностных водах наиболее удобными являются оптические методы. Их преимущество по сравнению с трудоемкими и дорогими контактными океанологическими наблюдениями заключается в оперативности, регулярности и больших объемах получаемой информации. Одной из наиболее информативных гидрооптических характеристик является коэффициент яркости моря, представляющий собой отношение яркости восходящего из моря излучения к яркости диффузно отражающего белого экрана.

Спектр восходящего излучения зависит от наличия в воде взвешенных частиц и растворенных органических веществ, таких как минеральная взвесь различного происхождения, клетки фитопланктона, содержащие хлорофилл *a* и другие пигменты, а также неживые органические частицы (детрит) и растворенная органика (желтое вещество). При этом количество неизвестных характеристик среды существенно превышает количество измеряемых параметров. Оценка характеристик водных масс по данным коэффициента яркости представляет собой классическую обратную задачу. Однако алгоритмы для решения этих задач, восстанавливающие концентрации примесей по спектру коэффициента яркости, недостаточно точны. В силу региональной специфики вод оценки концентрации хлорофилла *a* по оптическим данным, в частности спутниковым, могут в большой степени отличаться от реальных значений, особенно в прибрежных районах.

Спектрофотометры для измерений спектров коэффициента яркости моря являются одними из основных гидрооптических приборов при проведении океанологических подспутниковых экспериментов для опорной калибровки космических сканеров цвета нового поколения. Поэтому появляется все большее число работ, посвященных методике измерения коэффициента яркости, соответствующим приборам и определению биооптических параметров вод по результатам данных измерений [1 – 11].

В экспедиционных условиях коэффициент яркости можно определять различными способами. Одним из широко распространенных на первоначальном этапе исследований был способ определения с помощью измерителя яркости [1 – 5]. При этом процесс измерений проходил в два этапа: сначала проводилось измерение яркости горизонтально расположенного эталонного диффузно рассеивающего экрана, затем – яркости водной толщи. При дистанционных измерениях определяли также и яркость неба.

В ряде исследований коэффициент яркости находился по результатам одновременных измерений двух датчиков: измерителя падающей облученности и измерителя яркости, причем измерения восходящей яркости проводились как дистанционно, так и непосредственно в воде [6 – 11]. Однако при таких способах измерений существуют очень высокие требования к точности, долговременной стабильности и линейности характеристик датчиков. Измерения, проведенные одним прибором, разделены по времени, и это обстоятельство накладывает дополнительные ограничения на стабильность внешних погодных условий. При определениях двумя разными датчиками небольшие погрешности каждого из измерителей могут привести к недопустимым результирующим ошибкам. Кроме того, для таких измерений нужна абсолютная калибровка с высокой точностью фотометров яркости и облученности, что в настоящее время трудно осуществить в экспедиционных условиях.

Чтобы преодолеть вышеперечисленные трудности, в ряде стран были разработаны специальные широкодиапазонные высокостабильные фотометры для определения коэффициента яркости моря, в которых измерения облученности сверху, восходящей яркости, яркости неба производятся практически одновременно одним датчиком, но по разным оптическим каналам. Применение этих приборов повысило качество измерений, но проблемы абсолютной калибровки решены не были, поскольку каждому оптическому каналу необходима отдельная калибровка [6, 12 – 14].

**Приборы.** Один из наиболее совершенных приборов разработан в отделе оптики и биофизики моря Морского гидрофизического института РАН [15]. Он представляет собой универсальный спектрофотометр для измерений коэффициента яркости моря, позволяющий решать разнообразные подспутниковые задачи оптико-биологического направления (рис. 1). Спектральный диапазон измерений прибора составляет 390 – 720 нм, спектральное разрешение 5 нм, погрешность 3%. В нем предусмотрена возможность одновременного измерения углового распределения спектральной яркости восходящего излучения моря или яркости небосвода, нормированных на спектральную облученность поверхности моря. Калибровка прибора проводилась с помощью белого диффузно отражающего экрана с известным коэффициентом яркости.

Предусмотрена также возможность работы как с борта исследовательского судна или платформы, так и непосредственно с поверхности моря, на гидрологических станциях. В последнем случае измерения позволяют до минимума уменьшить перечисленные методические погрешности и получить контрольно-калибровочные данные с требуемой для решения биооптических задач точностью. Дистанционные измерения с борта научного судна или океанографической платформы обеспечивают большую информативность, но требуемая для подспутниковых задач точность измерений может быть достигнута только в ясную погоду, когда волнение моря не превышает 2 – 3 баллов, а условия освещения достаточно стабильные. При большем волнении, особенно при наличии мелкой ряби, помехи, связанные с солнечными бликами и отражением от взволнованной поверхности моря различных участков небосвода, становятся настолько большими, что их пока не удастся полностью устранить простой отбраковкой выбросов и специальными процедурами сглаживания.



**Рис. 1.** Спектрофотометр для измерений коэффициента яркости моря

При измерениях с борта в направлении, близком к надиру, коэффициент яркости моря выражается через измеряемые световые потоки формулой

$$\rho = \pi \frac{n^2}{T_1 T_2} \frac{L_u - r_f L_{sk}}{E_d}, \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления света водой;  $r_f = 0,02$  – френелевский коэффициент отражения при нормальном падении;  $T_1$  – коэффициент пропускания границей раздела воздух – вода;  $T_2$  – коэффициент пропускания грани-

цей раздела вода – воздух;  $L_u$  – восходящая яркость моря;  $L_{sk}$  – яркость диффузного излучения неба в зените;  $E_d$  – облученность поверхности моря.

Однако при такой постановке эксперимента велико влияние затенения корпусом прибора, и, чтобы этого избежать, измерения проводятся под углом  $\sim 45^\circ$  к надиру. При этом уже нельзя точно учесть коэффициент френелевского отражения, так как он зависит от шероховатости морской поверхности, состояния небосвода – поляризационных и спектрально-угловых характеристик рассеянного излучения, а также от геометрии наблюдений. Для определения отраженной составляющей восходящего излучения разрабатывались различные методики [3, 4, 13, 14, 16, 17], основанные как на моделировании, так и на специальных схемах измерения.

Для использования данного спектрофотометра предусмотрена методика измерений, состоящая в следующем. После измерения коэффициента яркости моря  $\rho_{sea}$  (рис. 2, слева) в поле зрения объектива спектрофотометра устанавливалась заполненная водой кювета с поглощающими стенками и дном для измерения в условиях той же освещенности коэффициента яркости только водной поверхности  $\rho_{surf}$  (рис. 2, справа). Спектры  $\rho_{surf}$  в последующем вычитались из спектров  $\rho_{sea}$ . Таким образом, определялся коэффициент яркости толщи вод моря  $\rho_w$ :

$$\rho_w = \rho_{sea} - \rho_{surf} \quad (2)$$

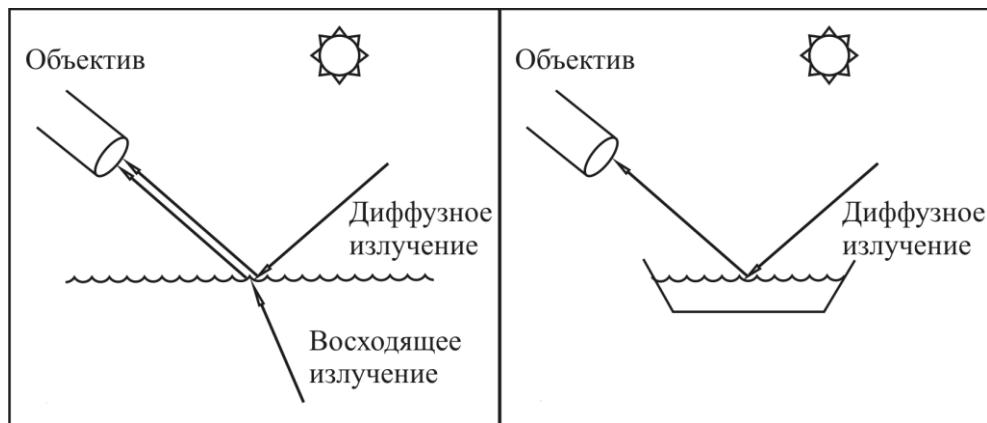
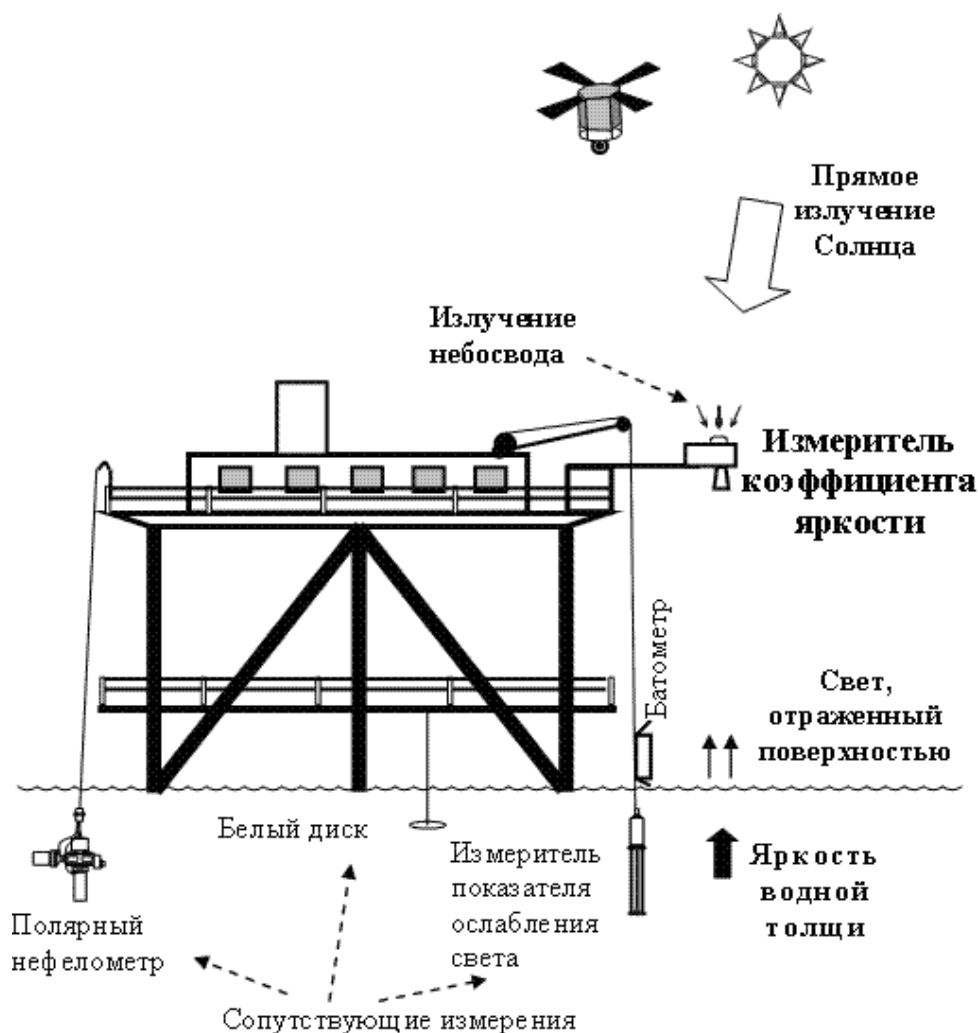


Рис. 2. Схема измерений коэффициента яркости морской воды

В дальнейшем величина  $\rho_w$  будет называться для краткости коэффициентом яркости воды.

Несмотря на то что процедура измерений несколько усложняется, такой метод позволяет учесть отраженную составляющую. Разница в состоянии взволнованной поверхности в море и в кювете выражается в большем разбросе данных измерений  $\rho_{sea}$ , который нейтрализуется отбраковкой выбросов и осреднением нескольких последовательных измерений.

**Данные.** В 2002 – 2014 гг. на океанографической платформе (пгт Кацивели) была осуществлена серия комплексных подспутниковых экспериментов по определению биооптических характеристик морской воды, в том числе коэффициента яркости (рис. 3). По результатам этих измерений можно заключить, что спектры коэффициента яркости в летне-осенний период имеют практически постоянную форму с максимумом в пределах 480 – 500 нм. Информация о полученных данных приведена в таблице и на рис. 4. Максимальные значения изменяются от 1% в октябре до 2% в июле. Исключение составляют результаты измерений во время сильнейшего за последние годы цветения кокколитофорид [18] в июле 2012 г., когда максимальное значение коэффициента яркости составило в среднем 4,5%, а отдельные значения достигли 6,6%, при этом форма измеряемых спектров не изменялась.



**Рис. 3.** Эксперимент по проведению комплексных измерений на океанографической платформе

Данные об измерениях спектра коэффициента яркости на океанографической платформе (пгт Кацивели)

Год	Дата	Количество измерений	Год	Дата	Количество измерений
2002	28.07 – 15.08	18	2008	10.09 – 13.09	21
2003	16.07 – 28.07	41	2010	11.08 – 16.08	35
2004	31.08 – 13.09	41	2010	23.09 – 28.09	37
2007	08.07 – 21.07	86	2012	07.07 – 16.07	72
2007	04.10 – 12.10	44	2014	11.08 – 14.08	19

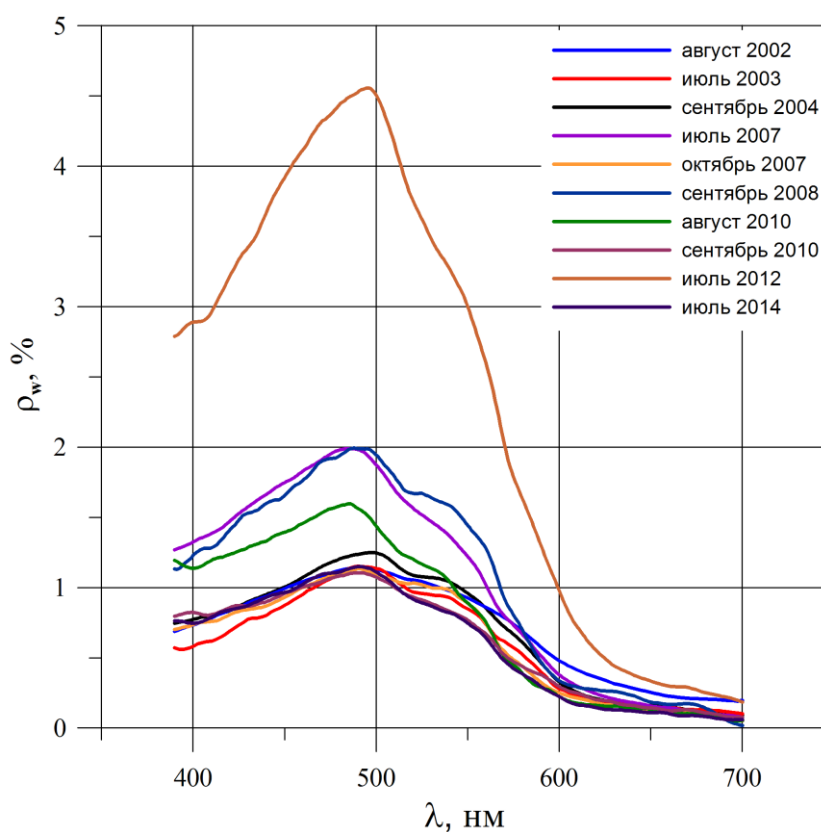
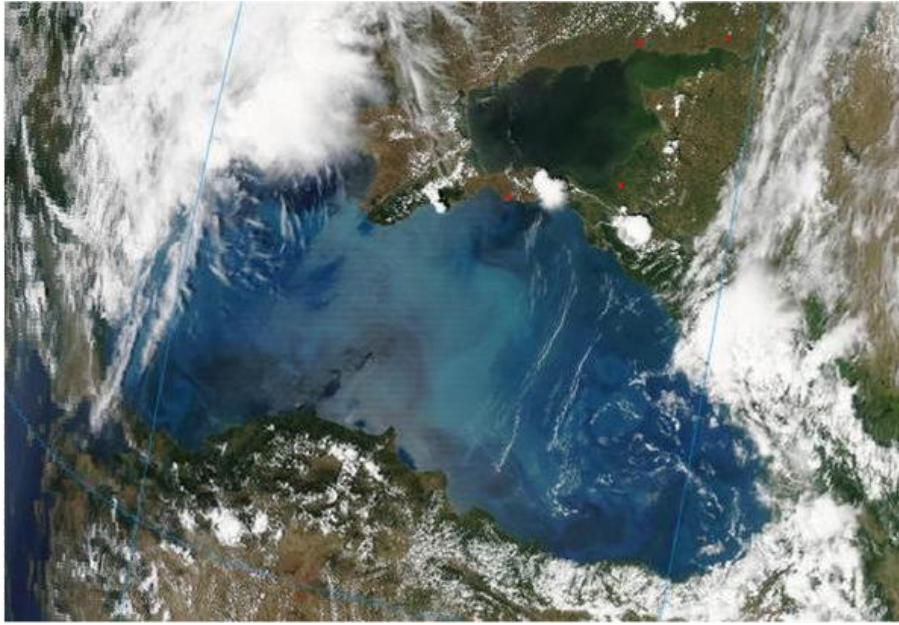
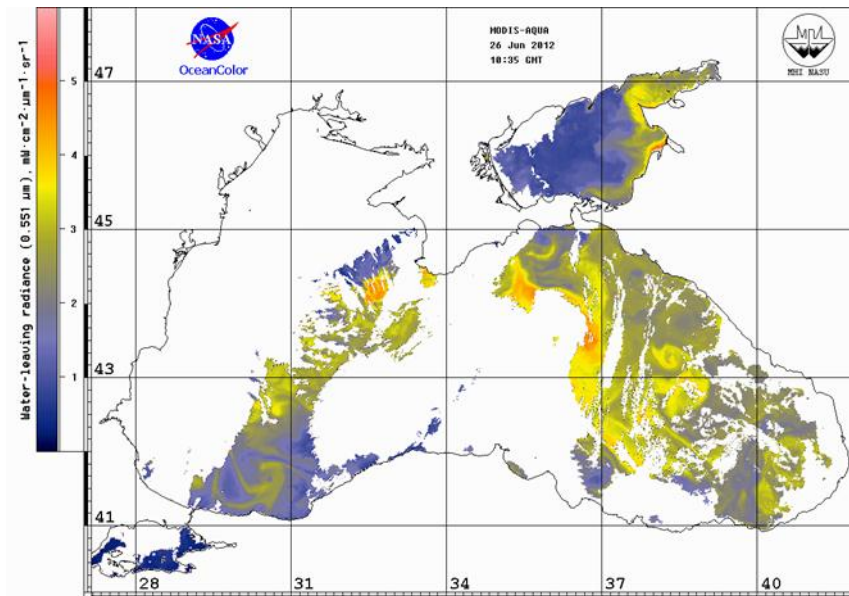


Рис. 4. Средние спектры коэффициента яркости морской воды

Наблюдение цветения представляло особый интерес, так как возрастание восходящей яркости при этом оказалось настолько сильным, что автоматические программы обработки спутниковых данных распознавали район цветения как облачность (рис. 5).



*a*



*б*

**Рис. 5.** Изображение Черного моря по спутниковым данным (*a*) и после применения маски облачности (*б*) за 26.06.12 (<http://blackseacolor.com>)

Кокколитофориды *Emiliana huxleyi* – одноклеточные водоросли с размером клеток 5 – 8 мкм, на поверхности каждой клетки находятся известковые

диски (кокколиты) размером 1 – 2 мкм [19]. В Черном море *Emiliania huxleyi* составляют 90 – 99% от общей численности кокколитофорид [20]. В процессе жизнедеятельности клетка несколько раз сбрасывает кокколиты, что приводит к многократному возрастанию количества крупной минеральной взвеси в воде и, как следствие, – к увеличению рассеяния света без существенного увеличения поглощения. Слабая спектральная селективность рассеяния на крупных частицах приводит к тому, что вода приобретает характерный белесый оттенок, по которому цветение кокколитофорид можно обнаружить визуально. Рост же рассеяния назад приводит к увеличению восходящей яркости моря и коэффициента яркости, который измерялся в данном эксперименте.

**Методика.** При решении обратных задач восстановления оптических свойств морской воды по коэффициенту яркости его обычно связывают с отношением  $\frac{b_b}{a}$ , где  $b_b$  – показатель обратного рассеяния морской воды,  $a$  – показатель поглощения:

$$\rho(\lambda) = k \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)}. \quad (3)$$

Спектры обратного рассеяния и поглощения, как правило, представляются в виде суммы соответствующих компонентов, и тогда спектр коэффициента яркости описывается формулой

$$\rho(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0)(\lambda_0/\lambda)^v}{a_w(\lambda) + C_{chl} a_{chl}^*(\lambda) + C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda-\lambda_0)}}, \quad (4)$$

где  $k = 0,15$  [21];  $b_{bw}(\lambda)$  – показатель обратного рассеяния чистой воды;  $v$  – показатель спектрального наклона обратного рассеяния, зависящий от размера частиц;  $a_w(\lambda)$  – показатель поглощения чистой воды [22];  $a_{chl}^*(\lambda)$  – спектр удельного поглощения пигментов фитопланктона [23];  $\alpha$  – параметр спектрального наклона поглощения неживой органики. Параметры модели:  $b_{bp}(\lambda_0)$  – показатель обратного рассеяния частиц взвеси на длине волны  $\lambda_0 = 400$  нм, концентрация пигментов фитопланктона  $C_{chl}$  и поглощение неживой органики  $C_{ddm}$  – рассчитываются путем оптимизации в специально разработанной итерационной процедуре, которая рассматривается далее.

С математической точки зрения вычисление параметров модельного спектра коэффициента яркости  $\rho_m$  по экспериментальным данным  $\rho_e$  сводится к поиску минимума выражения

$$f = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\rho_e(\lambda) - \rho_m(\lambda)]^2 \quad (5)$$

как функции  $f$  переменных  $b_{bp}(\lambda_0)$ ,  $C_{ddm}$  и  $C_{chl}$  на всем спектральном диапазоне, т. е. к решению системы уравнений



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{ddm})}{\partial b_{bp}} = 0, \\ \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{ddm})}{\partial C_{chl}} = 0, \\ \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{ddm})}{\partial C_{ddm}} = 0. \end{array} \right. \quad (6)$$

Такая минимизация дает решение математической задачи без учета приближенности модели. Сводя к минимуму отклонения экспериментальных данных от модельных спектров, мы устраняем только случайную погрешность эксперимента, считая модельные представления абсолютно достоверными. Однако модель не описывает и не может описать все возможные особенности поглощения и рассеяния растворенных и взвешенных веществ.

Полосы поглощения желтого вещества и пигментов фитопланктона перекрываются. При этом бóльшим концентрациям хлорофилла  $a$  соответствуют бóльшие концентрации растворенной органики только в среднем. Поэтому не всегда возможно выяснить, чем определяется форма спектра коэффициента яркости – наличием желтого вещества или пигментами фитопланктона.

В разработанном алгоритме эта проблема решается путем выделения участков в видимой области спектра; концентрация каждого вещества определяется на том спектральном участке, где его поглощение проявляется наиболее существенно по сравнению с влиянием других компонентов. Это дает возможность различить спектры поглощения, основываясь на известных общих закономерностях их поведения. Математически это выглядит как разделение системы уравнений (6) следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{ddm})}{\partial b_{bp}} \Big|_{\lambda_5}^{\lambda_6} = 0, \\ \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{ddm})}{\partial C_{chl}} \Big|_{\lambda_3}^{\lambda_4} = 0, \\ \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{ddm})}{\partial C_{ddm}} \Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2} = 0, \end{array} \right. \quad (7)$$

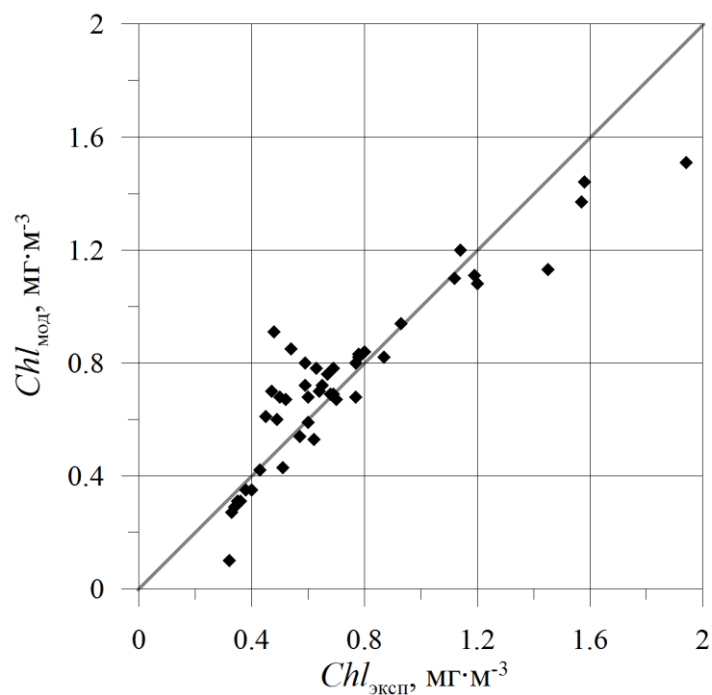
то есть на каждом участке минимизация выполняется по одной переменной, остальные же параметры считаются при этом постоянными. Это значительно упрощает вычисления и стабилизирует решение обратной задачи.

Значения  $\lambda_i$  были определены в численном эксперименте, описанном в [24]. Используются участки спектра 390 – 410 нм для поглощения неживой органики, 420 – 460 нм – для концентрации хлорофилла  $a$  и 460 – 650 нм – для рассеяния взвеси. На первом этапе определяется минимум выражения (5) как функции переменной  $b_{bp}(\lambda_0)$ , в первом приближении концентрации растворенного органического вещества и пигментов принимаются равными ну-

лю. Затем выражение (5) минимизируется как функция  $C_{chl}$ , и концентрация пигментов вычисляется с учетом полученного значения рассеяния взвеси; аналогично находится и значение концентрации растворенной органики  $C_{ddm}$ .

На втором и последующих этапах значения  $b_{bp}(\lambda_0)$  определяются с использованием величин  $C_{chl}$  и  $C_{ddm}$ , рассчитанных на предыдущем шаге. Таким образом, получаем итерационный алгоритм, позволяющий вычислять параметры  $C_{ddm}$ ,  $b_{bp}(\lambda_0)$  и  $C_{chl}$ . Для достижения условия остановки  $|C_{chl}^i - C_{chl}^{i-1}| < 0,001$  требуется до 10 итераций.

**Результаты и обсуждение.** Концентрации пигментов фитопланктона, рассчитанные по спектрам коэффициента яркости, были сопоставлены с данными натурных измерений концентрации хлорофилла *a* [25], проводившихся параллельно с оптическими измерениями в 2002 – 2004 гг. Результат этого сопоставления приведен на рис. 6. При больших концентрациях пигментов наблюдается занижение рассчитанных концентраций по сравнению с измеренными. Это объясняется тем, что используемая модель поглощения пигментами линейна и не учитывает «эффект упаковки».



**Рис. 6.** Сравнение рассчитанных концентраций пигментов фитопланктона ( $Chl_{mod}$ ) с измеренными концентрациями хлорофилла *a* ( $Chl_{эксп}$ ) по данным 2002 – 2004 гг.

Основным источником погрешностей такого способа расчета неизвестных концентраций является неверная оценка входных параметров модели, таких как спектральные наклоны  $\alpha$  и  $\nu$ , а также удельное поглощение хлорофилла  $a$ . Ранее было показано, что наибольшее влияние на точность восстановления оказывает спектральный наклон поглощения неживой органики. Из литературных данных известно [25 – 27], что значения спектрального наклона суммарного поглощения растворенной органики и детрита могут изменяться в пределах  $0,015 - 0,02 \text{ nm}^{-1}$ , что приводит к изменению рассчитываемых концентраций хлорофилла  $a$  на 25%. В данной работе спектральный наклон  $\alpha$  считался постоянным и равным  $0,017 \text{ nm}^{-1}$ .

При наблюдении цветения кокколитофорид в 2012 г. в связи с отсутствием прямых измерений концентрации хлорофилла  $a$  сравнения результатов проводились со спутниковыми данными (осредненными по нескольким пикселям), полученными в районе океанографической платформы. На рис. 7 приведен временной ход значений  $C_{chl}$ . Видно, что цветение кокколитофорид не приводит к существенному росту поглощения пигментами фитопланктона. Это происходит скорее всего потому, что известковая оболочка кокколитофорид затрудняет проникновение света внутрь клетки. При этом средняя концентрация составляла  $\sim 0,5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , что несколько превышает средние значения для летнего периода, однако такое завышение содержания хлорофилла  $a$  согласуется с наблюдениями других авторов [28].

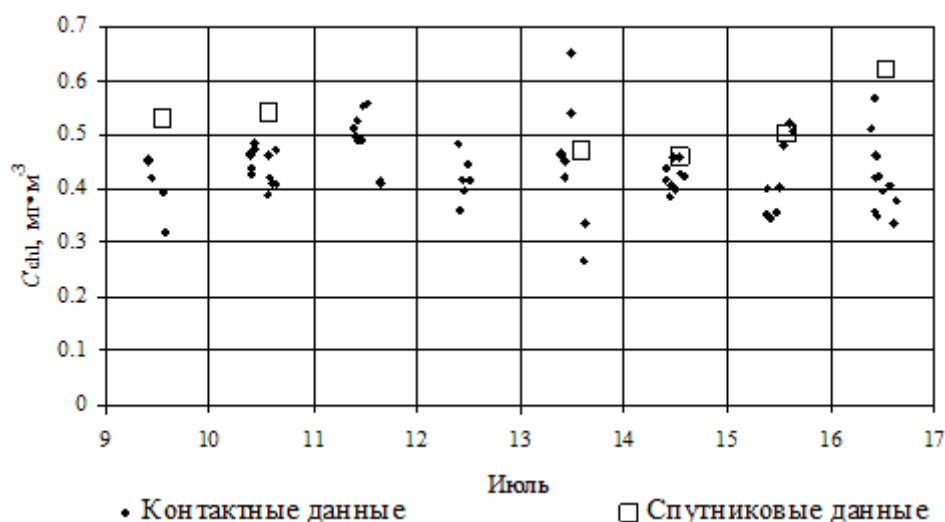
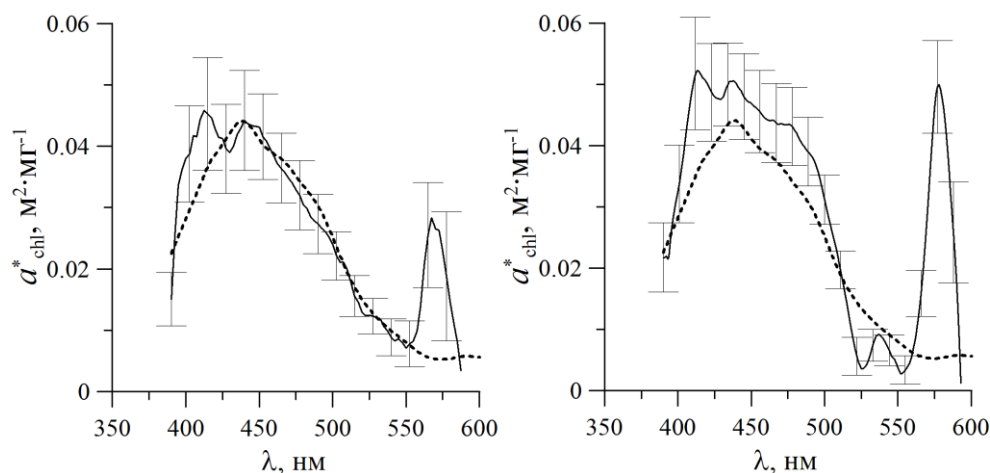


Рис. 7. Временной ход концентрации пигментов фитопланктона в июле 2012 г.

После расчета трех параметров модели можно вычислить спектр поглощения пигментов, который, в отличие от стандартного, будет содержать не только хлорофилльные максимумы. Эти максимумы объясняют отличие измеренного спектра коэффициента яркости морской воды от рассчитанного по

уже известным параметрам  $b_{bp}(\lambda_0)$ ,  $C_{chl}$  и  $C_{ddm}$ . Такие отклонения наблюдаются в узких спектральных участках и в целом не влияют на расчет параметров. Максимум поглощения на длине волны 412 нм (рис. 8) можно соотнести с продуктами распада хлорофилла *a* (хлорофиллид *a*, феофитин и другие); на длинах волн  $\sim 570$  нм такой максимум можно объяснить наличием в воде цианобактерий, содержащих пигменты фикоэритрины. Кроме того, фикоэритрины имеют максимум флюоресценции на длине волны 575 – 585 нм, что объясняет резкий провал на длинах волн, больших 580 нм в восстановленном спектре поглощения, а также возникновение отрицательных значений [29].



**Рис. 8.** Средние спектры поглощения пигментов фитопланктона (сплошная линия) в июле 2003 г. (слева) и в июле 2012 г. (справа). Штриховой линией показан модельный спектр [23]

Спектры поглощения рассчитывались по формуле

$$a_{chl}^*(\lambda) = \frac{1}{C_{chl}} \left[ \frac{kb_b(\lambda)}{\rho(\lambda)} - a_w(\lambda) - C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda-\lambda_0)} \right]. \quad (8)$$

Удельное поглощение пигментами фитопланктона, рассчитанное по данным контактных измерений коэффициента яркости, также имеет типичные для летнего сезона значения и спектральный ход (рис. 8). Наличие кокколитофорид не приводит к существенному изменению формы спектра и величин поглощения.

Расчеты показывают, что восстановленные концентрации неживой органики и обратное рассеяние взвеси слабо связаны с концентрацией хлорофилла *a*, определенной биологическими методами. Например, по результатам эксперимента в сентябре 2004 г. среднее значение  $C_{ddm}$  составляло  $0,133 \text{ м}^{-1}$ , среднее значение  $b_{bp}(\lambda_0)$  было равно  $0,0059 \text{ м}^{-1}$ . Указанные значения хорошо согласуются с биологическими данными прямых измерений этих величин. По данным [27], среднее значение показателя поглощения растворенной органики на длине волны 440 нм составляло  $0,08 \text{ м}^{-1}$ , показателя поглощения детри-

та  $\sim 0,06 \text{ м}^{-1}$ . Поскольку параметр  $C_{\text{ddm}}$  описывает сумму поглощения растворенной органики и детрита, между измеренными и рассчитанными значениями наблюдается хорошее соответствие.

При измерениях показателя обратного рассеяния с помощью нефелометра было получено среднее значение  $0,0048 \text{ м}^{-1}$  на длине волны 443 нм. При пересчете восстановленных значений  $b_{\text{bp}}(400)$  к длине волны 443 нм по спектральному закону, принятому в модели для обратного рассеяния, получена величина  $0,0053 \text{ м}^{-1}$ , что близко к обратному рассеянию, измеренному экспериментально.

При обработке данных, полученных во время цветения, важно правильно выбрать исходные параметры модели рассеяния минеральной взвеси, так как именно она оказывает наибольшее влияние на оптические свойства морской воды. Поскольку в модели не проводится разделение взвеси на крупную и мелкую фракции, параметр  $b_{\text{bp}}(\lambda_0)$  будет определять рассеяние всеми взвешенными минеральными частицами независимо от размера, т. е. кокколитами, клетками кокколитофорид, а также минеральной взвесью иного происхождения. Не изменившаяся форма спектра коэффициента яркости показывает, что возрастание рассеяния не сопровождалось ростом поглощения, что возможно при преобладании количества кокколитов над крупной взвесью, включающей клетки. По литературным данным [28, 30], при наблюдающейся ситуации численность кокколитов на порядок выше численности иной минеральной взвеси и на два порядка – численности клеток кокколитофорид. Поэтому в данной работе термин «минеральная взесь» означает минеральную взесь, включающую кокколиты. Из работ [28, 31] известно, что спектральный наклон обратного рассеяния смесью кокколитов и клеток кокколитофорид  $\nu$  равен 0,8.

Оценить масштабы цветения и численность кокколитофорид можно по результатам расчета обратного рассеяния взвеси. Для того чтобы воспользоваться эмпирическим соотношением из работы [31]

$$b_{\text{b\_coccc}}(546) = 1,1 \cdot 10^{-13} N_{\text{coccc}}, \quad (9)$$

связывающим обратное рассеяние взвеси (кокколитов)  $b_{\text{b\_coccc}}(546)$  на длине волны 546 нм и численную концентрацию кокколитов  $N_{\text{coccc}}$  ( $\text{м}^{-3}$ ), полученное по результатам модельных расчетов обратное рассеяние  $b_{\text{bp}}(400)$  было пересчитано для длины волны 546 нм с учетом спектрального хода:

$$b_{\text{b\_coccc}}(546) = b_{\text{bp}}(400)(400/546)^{0,8}. \quad (10)$$

Одновременно делалась оценка концентрации кокколитов по спутниковым данным, а именно по содержанию углерода в минеральной взвеси (*particulate inorganic carbon*, *pic*, моль (C)· $\text{м}^{-3}$ ), которое является одним из стандартных продуктов сканера *MODIS*. Данные *pic* были пересчитаны в концентрацию кокколитов с помощью соотношения

$$pic \cdot \mu(C) = m_{C\_coccc} N_{coccc}, \quad (11)$$

где  $\mu(C)$  – молярная масса углерода;  $m_{C\_coccc} = 2 \cdot 10^{-13} \text{ г}$  – содержание углерода в кокколите по данным [28].

Временной ход величин  $N_{coccc}$ , полученных по таким оценкам, приведен на рис. 9. В среднем значение концентрации составляло  $1,2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , что соответствует концентрации клеток кокколитофорид  $\sim 10^6 \text{ кл} \cdot \text{л}^{-1}$ . Полученные концентрации минеральной взвеси, так же как и завышенные в 3–4 раза коэффициенты яркости, указывают на то, что наблюдавшееся цветение было одним из самых массовых за последние годы [20].

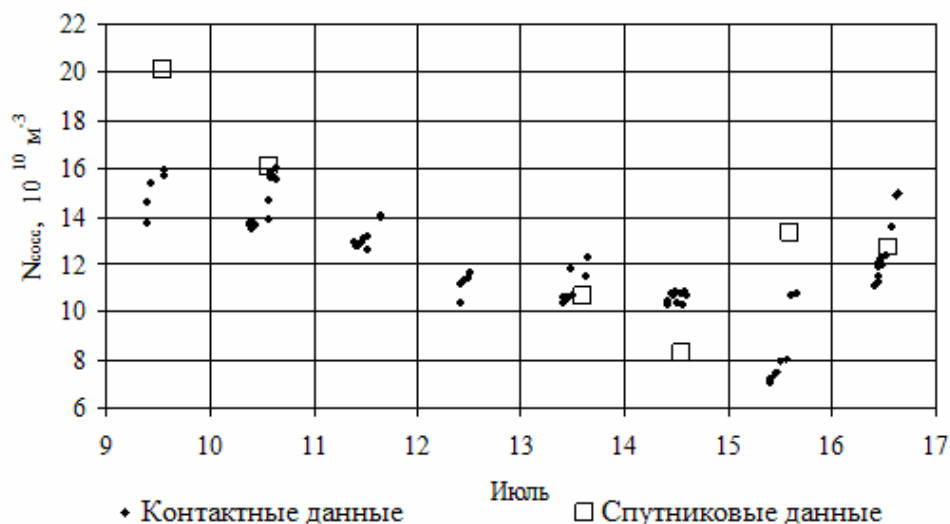


Рис. 9. Временной ход концентрации минеральной взвеси

**Заключение.** Спектрофотометр для измерения коэффициента яркости моря, разработанный отделом оптики МГИ, позволяет решать различные задачи биооптики моря, включающие в том числе валидацию спутниковых измерений. Конструкция спектрофотометра дает возможность применять его в различных условиях эксперимента, а устройство не предполагает необходимости абсолютной калибровки. Схема измерений построена таким образом, что позволяет достаточно точно учесть свет, отраженный поверхностью моря, не прибегая к расчетам и модельным представлениям. В целом прибор дает возможность быстро и эффективно охарактеризовать биооптическое состояние морской среды.

Алгоритм обработки данных коэффициента яркости и вычисления концентраций оптически активных примесей – пигментов фитопланктона, взвеси и неживой органики – учитывает характерные особенности оптических свойств исследуемого района. Кроме того, в нем используется специально

разработанная итерационная процедура, позволяющая упростить вычисления и сделать решение обратной задачи устойчивым.

Полученные с помощью аналитического алгоритма величины концентраций хлорофилла *a* хорошо согласуются с данными прямых измерений. По результатам обработки данных, полученных в ходе подспутникового эксперимента (2002 – 2004 гг.), в котором проводились прямые измерения концентрации хлорофилла *a*, отклонения рассчитанных аналитическим методом концентраций хлорофилла *a* от измеренных составляют ~10%.

Расчетная концентрация хлорофилла *a* во время цветения кокколитофорид (июль 2012 г.) составляла ~0,5 мг·м<sup>-3</sup>, что превышает средние значения для летнего периода [26]. Причина такого повышения может заключаться в массовом развитии других видов фитопланктона наряду с кокколитофоридами, однако такое повышение согласуется с наблюдениями других авторов [28].

Полученные концентрации неживой органики также хорошо согласуются с биологическими данными, а обратное рассеяние взвесью – с данными непосредственного измерения показателя рассеяния в 2004 г. Расчетная концентрация минеральной взвеси во время цветения кокколитофорид в 2012 г. составляла ~1,2·10<sup>11</sup> м<sup>-3</sup>, что по порядку величин соответствует цветениям, зафиксированным в 1992 и 2006 гг. Эти данные указывают на то, что наблюдавшееся цветение было одним из самых массовых за последние годы [20].

Поскольку спектр коэффициента яркости измеряется с высоким разрешением (5 нм), по нему можно рассчитать спектры удельного поглощения пигментов фитопланктона. Дополнительные максимумы поглощения дают информацию о наличии в воде вспомогательных фотосинтетических пигментов. Аналитический алгоритм позволяет оценить наличие в воде веществ, которые затруднительно определить биологическими методами.

Полученная методика также может применяться для обработки спектров коэффициента яркости, измеренных спутниковыми сканерами, при дистанционном зондировании Черного моря, проведении мониторинга экологического состояния Черноморского бассейна.

Работа выполнена в МГИ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0110) и РФФИ (научный проект № 14-45-01049 «Разработка регионального алгоритма определения биооптических характеристик прибрежных вод Черного моря по данным дистанционного зондирования»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пелевин В.Н., Локк Я.Ф., Кельбалиханов Б.Ф. Фотометр для измерения спектральной яркости выходящего из моря излучения и результаты его испытаний в натуральных условиях // Оптические исследования в океане и атмосфере над океаном. – М.: Изд. ИОАН, 1975. – С. 126 – 134.

2. *Афонин Е.И., Лу М.Е.* Телефотометр для измерения яркости природных объектов в видимом диапазоне спектра // Тез. докл. Пятой всесоюзной научно-технической конференции «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение». – М.: Изд. ВНИИОФИ, 1984. – С.115.
3. *Morel A.* In-water and remote measurements of ocean color // *Bound.-Lay. Meteorol.* – 1980. – 18, № 2. – P. 177 – 201.
4. *Hooker S.B., Lazin G., Zibordi G. et al.* An evaluation of above- and in-water methods for determining water-leaving radiances // *J. Atmos. Ocean. Technol.* – 2002. – 19, № 4. – P. 486 – 515.
5. *Toole D.A., Siegel D.A., Menzies D.W. et al.* Remote-sensing reflectance determinations in the coastal ocean environment: impact of instrumental characteristics and environmental variability // *Appl. Opt.* – 2000. – 39, № 3. – P. 456 – 469.
6. *Weeks A.R., Robinson I.S., Booty B.* A towed near-surface optical reflectance meter for measuring ocean colour in support SeaWiFS // European workshop on optical ground truth instrumentation for the validation of space-borne optical remote sensing data of the marine environment. NIOZ-Raport. – 1993. – P. 3 – 9.
7. *Lee Z.P., Carder K.L., Haves S.K. et al.* Method to derive ocean absorption coefficient from remote sensing reflectance // *Appl. Opt.* – 1996. – 35, № 3. – P. 453 – 462.
8. *Mueller J.L., Zaneveld J.R., Pegau S. et al.* Remote sensing reflectance: preliminary comparisons between in water and above water measurements and estimates modelled from measured inherent optical properties. *Ocean Optics XIII // Proc. of SPIE.* – 1996. – 2963. – P. 502 – 507.
9. *Olszewski J., Darecki M.* Derivation of remote sensing reflectance of Baltic waters from above-surface measurements // *Oceanologia.* – 1999. – 41, № 1. – P. 99 – 111.
10. *Artemiev V.A., Burenkov V.I., Vortman M.I. et al.* Sea-truth measurements of ocean color: a new floating spectroradiometer and its metrology // *Oceanology.* – 2000. – 40, № 1. – P. 139 – 145.
11. *Khrapko A.N., Kopelevich O.V., Burenkov V.I. et al.* New instrument for measuring surface and underwater irradiances // *Proc. IV International Conf. «Current problems in optics of natural waters».* – Nizhny Novgorod, 2007. – P. 271 – 275.
12. *Smith R.C., Menzies D.W., Booth C.R.* Oceanographic bio-optical profiling system II. *Ocean Optics XIII // Proc. of SPIE.* – 1996. – 2963. – P. 777 – 789.
13. *Zibordi G., Mélin F., Hooker S.B. et al.* An autonomous above-water system for the validation of ocean color radiance data // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* – 2004. – 42, № 2. – P. 401 – 415.
14. *Zibordi G., Berthon J.-F., Mélin F. et al.* Validation of satellite ocean color primary products at optically complex coastal sites: Northern Adriatic Sea, Northern Baltic Proper and Gulf of Finland // *Rem. Sens. Environ.* – 2009. – 113, № 12. – P. 2574 – 2591.
15. *Лу М.Е., Мартынов О.В.* Измеритель коэффициентов яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. – С. 163 – 173.
16. *Mobley C.D.* Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // *Appl. Opt.* – 1999. – 38, № 36. – P. 7442 – 7455.
17. *Lee Z.P., Ahn Y.H., Mobley C. et al.* Removal of surface-reflected light for the asurement of remote-sensing reflectance from an above-surface platform // *Optics Express.* – 2010. – 18, № 25. – P. 26313 – 26324.
18. *Ясакова О.Н., Станичный С.В.* Аномальное цветение *Emiliania Huxleyi* (Prymnesiophyceae) в Черном море в 2012 году // *Морской экологический журнал.* – 2012. – Т. XI, № 4. – С. 54.
19. *Balch W.M., Kilpatrick K.A., Holligan P.M. et al.* The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic. II. Relating optics to coccolith concentration // *Limnol. Oceanogr.* – 1996. – 41, № 8. – P. 1684 – 1696.
20. *Микаэлян А.С., Силкин В.А., Паутова Л.А.* Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // *Океанология.* – 2011. – 51, № 1. – С. 45 – 53.



21. Шибанов Е.Б. Численный метод решения уравнения переноса. Коэффициенты отражения и пропускания оптически тонкого плоскопараллельного слоя // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 3. – С. 62 – 71.
22. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum 380–700 nm of pure water. II. Integrating cavity measurements // Appl. Opt. – 1997. – 36, № 33. – P. 8710 – 8723.
23. Bricaud A., Babin M., Morel A. et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // J. Geophys. Res. – 1995. – 100, № C7. – P. 13321 – 13332.
24. Korchemkina E.N., Shybanov E.B. Special minimization technique for analytical algorithms of chlorophyll retrieval // Proc. V International Conf. «Current problems in optics of natural waters». – Saint-Petersburg, 2009. – P. 73 – 77.
25. Chami M., Shybanov E.B., Churilova T.Y. et al. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) // J. Geophys. Res.–2005. – 110, № C11. – P. 1 – 17.
26. Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П. Поглощение света фитопланктоном, детритом и растворенным органическим веществом в прибрежном районе Черного моря (июль – август 2002 г.) // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 4. – С. 39 – 50.
27. Churilova T., Suslin V., Berseneva G. et al. Parameterization of light absorption by phytoplankton, nonalgal particles and coloured dissolved organic matter in the Black Sea // Proc. IV International Conf. «Current problems in optics of natural waters». – Nizhny Novgorod, 2007. – P. 70 – 74.
28. Balch W.M., Holligan P.M., Ackleson S.G. et al. Biological and optical properties of mesoscale coccolithophore blooms in the Gulf of Maine // Limnol. Oceanogr. – 1991. – 36, № 4. – P. 629 – 643.
29. Rowan K.S. Photosynthetic Pigments of Algae. – Cambridge: Cambridge University Press, 1989. – 334 p.
30. Voss K.J. Scattering and attenuation properties of *Emiliania huxleyi* cells and their detached coccoliths // Limnol. Oceanogr. – 1998. – 43, № 5. – P. 870 – 876.
31. Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин Е.И. и др. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х – начале 90-х годов. – Севастополь, 1996. – 32 с. – (Препринт / НАН Украины. МГИ).

## Retrieval of seawater components' concentration from upwelling radiation spectrum

**M.E. Lee, E.B. Shybanov, E.N. Korchemkina, O.V. Martynov**

*Marine Hydrophysical Institut, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
e-mail: michael.lee.mhi@gmail.com*

Discussed are the results of the seawater reflectance measurements carried out in 2002 – 2014 on the oceanographic platform of MHI ED by the spectrophotometer developed in the department of marine optics. Special measurement technique permits to take into account the surface-reflected light that, in its turn, relieves one of necessity to perform under-surface probing. The algorithm of the obtained data processing allows calculating of the following seawater optical characteristics: concentration of phytoplankton pigments, absorption by nonliving organic matter and dispersion by suspended matter, and also to detect presence of auxiliary photosynthetic pigments based on the reconstructed spectrum of phytoplankton absorption. The method under consideration permits to carry out operational sub-satellite monitoring of marine environment state, particularly, to validate the algorithms for processing remote sensing data.

**Keywords:** seawater reflectance, spectrophotometer, chlorophyll *a*, mineral particles, coccolithophores, phytoplankton pigments.