

В.В. Суслин<sup>1</sup>, Т.Я. Чурилова<sup>2</sup>, С.Ф. Пряхина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

<sup>2</sup> *Институт биологии южных морей НАН Украины, г. Севастополь*

### РЕГИОНАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ЦВЕТОВОГО СКАНЕРА *SeaWiFS*

Описывается алгоритм восстановления первичных гидрооптических характеристик Черного моря, *IOPs*, по данным цветового сканера *SeaWiFS*:  $b_{bp}(\lambda)$  – коэффициент обратного рассеяния света взвесью на длине волны 555 нм,  $n_p$  – показателя спектрального хода  $b_{bp}(\lambda)$ ,  $a_{CDM}(\lambda)$  – суммарного коэффициента поглощения света растворенной органикой и неживой взвесью на длине волны 490 нм,  $S$  – показателя спектрального хода  $a_{CDM}(\lambda)$ ,  $C_a$  – концентрации хлорофилла-«а». Восстановленный набор *IOPs* был проанализирован совместно с *in situ* измерениями био-оптических характеристик фитопланктона, полученных в западной глубоководной части Черного моря за период с 1998 по 1999 гг. Выявлены проявления как минимум четырех интересных ситуаций, связанных с (1) изменением величины наклона спектрального коэффициента поглощения неживым органическим веществом, (2) цветением кокколитофорид, (3) доминированием крупного фитопланктона, (4) присутствием пико-планктона. Приводятся примеры пространственного распределения и временной динамики этих особенностей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Черное море, SeaWiFS, региональный алгоритм, первичные гидрооптические характеристики, спектральные особенности, оптически активные вещества.*

**Введение.** Спектральный состав света, выходящего из-под поверхности воды, зависит от первичных гидрооптических характеристик *IOPs*\*. Прямая задача, т.е. восстановление коэффициента яркости моря ( $R_{RS}(\lambda)$ ) по заданным *IOPs*, описана, например, в работе [1]. В литературе описаны методы решения обратной задачи, т.е. восстановления *IOPs* по заданному спектру  $R_{RS}(\lambda)$ . Наиболее полный обзор применяемых в настоящее время методов решения обратной задачи был дан в [2]. В приложении к Черному морю восстановление отдельных параметров *IOPs* по спутниковым данным описано в работах [3–6]. Для решения обратной задачи, которая, как правило, плохо обусловлена, применяются различные приемы:

- использование разных спектральных интервалов внутри видимого диапазона для вычисления отдельных компонент *IOPs*;
- наложение дополнительных связей между *IOPs* и  $R_{RS}(\lambda)$ , либо простое фиксирование отдельных компонент *IOPs*;

Все эти приемы направлены на то, чтобы повысить устойчивость решения обратной задачи.

*In situ*\* измерения *IOPs* и самих спектров  $R_{RS}(\lambda)$  являются исключительно ценным материалом для настройки решения как прямых так и обратных задач.

---

\* См. список используемых аббревиатур в конце статьи.

Но таких измерений очень мало, тем более, когда речь идет о Черном море. Проведение подспутниковых измерений, которые включают полный набор *IOPs* и соответствующие им измерения  $R_{RS}(\lambda)$ , чрезвычайно трудная и дорогостоящая задача. В настоящий момент для Черного моря известны только два таких эксперимента [7, 8]. Количество экспериментов, в которых измерялись отдельные компоненты *IOPs* или  $R_{RS}(\lambda)$  несколько больше [9 – 17], но многие из них имеют ограниченные возможности их совместного анализа со спутниковыми измерениями, в первую очередь, из-за близости к суше (менее 2 миль) и присутствия облачности на момент пролета спутника. Другое ограничение связано с тем, что наблюдается расхождение между *in situ*  $R_{RS}(\lambda)$  и спутниковым значением  $R_{RS}(\lambda)$  [18]. Считается, что причиной тому является некорректный учет ряда факторов при выполнении атмосферной коррекции, как-то: некорректный выбор аэрозольной модели, эффекты, связанные с геометрией и спецификой измерения цветовым сканером и некоторые другие [19, 20]. Чтобы нивелировать эти ошибки, разрабатываются критерии устранения такого расхождения [3, 21]. В то же время для Черного моря мы имеем уникальный массив  $R_{RS}(\lambda)$  за 13 лет работы цветового сканера *SeaWiFS* \*. Поэтому чрезвычайно актуальным является развитие методов восстановления *IOPs*, используя данные цветовых сканеров и, в частности, *SeaWiFS*.

В этой работе описывается региональный алгоритм восстановления *IOPs* с учетом особенностей оптических свойств бассейна Черного моря, использующий данные *SeaWiFS* [22], прошедшие специальную фильтрацию.

Набор восстанавливаемых *IOPs* включает в себя следующие параметры:

$b_{bp}(\lambda)$  – коэффициент обратного рассеяния света взвесью на длине волны 555 нм;

$n_p$  – показатель спектрального хода  $b_{bp}(\lambda)$ ;

$a_{CDM}(\lambda)$  – суммарный коэффициент поглощения света растворенной органикой и неживой взвесью на длине волны 490 нм;

$S$  – показатель спектрального хода  $a_{CDM}(\lambda)$ ;

$C_a$  – концентрация хлорофилла-«а» в море;

*тип решения* согласно [6] – вспомогательный параметр, который формально не относится к параметрам *IOPs*, но косвенно содержит информацию о спектральных характеристиках коэффициента удельного поглощения фитопланктона.

**Материалы.** В работе были использованы спутниковые данные *SeaWiFS* второго уровня (*Level 2*) версии R2010.0: коэффициенты яркости моря (далее,  $R_{RS}$ ) для первых пяти спектральных каналов (СК) и их некоторые отношения (см. табл. П1 в Приложении). Для района, охватывающего Черное море, эти данные были проинтерполированы на сетку с шагом 0,035° по долготе и 0,025° по широте. Шаг осреднения по времени составлял половину календарного месяца, т. е. каждый месяц был разбит на две части, равные приблизительно двум неделям. Спутниковые данные охватывали весь период работы цветового сканера *SeaWiFS* с сентября 1997 года по декабрь 2010 года и соответствовали следующим критериям:

---

\* См. список используемых аббревиатур в конце статьи.

– величина  $R_{RS}(\lambda)$  после атмосферной коррекции не должна быть отрицательной для любого из СК;

– количество итераций поиска решения при выполнении атмосферной коррекции не должно превышать его значения по умолчанию в программе *SeaDAS*\* [23];

– рядом с обрабатываемым участком моря не должен находиться объект повышенной яркости (как правило, это облачность или суша);

– обрабатываемый участок моря находится вне зоны блика.

Все такие ситуации, за исключением первой, в стандартном спутниковом продукте второго уровня [21] помечены специальными значками, так называемыми «флагами», что существенно облегчает процедуру их фильтрации.

Для анализа результатов были выбраны шесть районов. Пять из них расположены в глубоководной части моря и охватывают участки поверхности моря, ограниченные координатами:

1)  $42,93^\circ - 43,5^\circ$  с.ш. и  $30,85^\circ - 31,66^\circ$  в.д.;

2)  $42,90^\circ - 43,5^\circ$  с.ш. и  $36,10^\circ - 36,90^\circ$  в.д.;

3)  $41,90^\circ - 42,5^\circ$  с.ш. и  $38,40^\circ - 39,20^\circ$  в.д.;

4)  $42,90^\circ - 43,5^\circ$  с.ш. и  $33,70^\circ - 34,50^\circ$  в.д.;

5)  $42,20^\circ - 42,8^\circ$  с.ш. и  $29,80^\circ - 30,60^\circ$  в.д.

Шестой расположен на северо-западном шельфе и охватывает район, ограниченный координатами:  $44,55^\circ - 45,125^\circ$  с.ш. и  $30,85^\circ - 31,655^\circ$  в.д.

#### **Методика расчета $IOPs$ по данным *SeaWiFS*.**

Спутниковые данные, в каждом узле сетки осредненные по времени и пространству, рассчитывались из продуктов *Level 2* с учетом фильтрации с помощью флагов и масок (см. выше). Решение находилось в каждом узле сетки методом итераций. В результате каждой итерации по данным *SeaWiFS* определялся следующий набор  $IOPs$ , описанный во введении.

Максимальное число итераций составляло три, минимальное – две итерации. Каждая итерация состояла из трех шагов (см. табл. 1), на каждом из которых для определенного спектрального интервала последовательно находился весь набор  $IOPs$ .

На первом шаге 1-ой итерации находятся значения  $a_{CDM}(490)$ ,  $C_a$  и *тип решения* как минимум невязки между спутниковым значением  $I_s(\lambda)$  и модельным расчетом  $I_m(\lambda)$  для СК 490 нм и 510 нм отдельно для двух *типов решений*. Решением считается тот *тип решения* и те значения  $a_{CDM}(490)$ ,  $C_a$ , для которых невязка минимальна. Модельные значения  $S$ ,  $b_{bp}(555)$  и  $n_p$  на этом шаге считались известными и равными  $0,018 \text{ нм}^{-1}$ ;  $0,00093 \text{ м}^{-1}$  и  $1,0$  соответственно. На втором шаге 1-ой итерации находятся значения  $b_{bp}(555)$  и  $n_p$  как минимум невязки между модельными и спутниковыми значениями  $R_{RS}(\lambda)$  в СК 490 нм и 555 нм. На этом шаге при расчете модельных значений  $R_{RS}(\lambda)$  значения параметров  $a_{CDM}(490)$ ,  $C_a$  и *тип решения* брались из решения первого шага, значение  $S$  оставалось неизменным  $0,018 \text{ нм}^{-1}$ . На последнем шаге 1-ой итерации находилось значение  $S$  как минимум невязки между спутниковым значением  $I_s(\lambda)$  и модельным расчетом  $I_m(\lambda)$  в СК 412 нм.

---

\* См. список используемых аббревиатур в конце статьи.

Входные данные  $a_{CDM}(490)$ ,  $C_a$ ,  $b_{bp}(555)$ ,  $n_p$  и тип решения берутся как решения первых двух шагов.

Первый шаг 2-ой итерации отличается от первого шага 1-ой итерации только тем, что мы используем для расчета модельных значений  $I(\lambda)$  решения для  $S$ ,  $b_{bp}(555)$  и  $n_p$ , найденные в 1-ой итерации. В результате находим новое значение для  $a_{CDM}(490)$ ,  $C_a$  и тип решения. Заметим, что тип решения после этого шага может измениться! Второй и третий шаги аналогичны соответствующим шагам 1-ой итерации. Третья итерация выполняется только тогда, когда тип решения, найденный на первом шаге 1-ой итерации не совпадает с типом решения, найденным на первом шаге 2-ой итерации. В этом случае, первый шаг 3-й итерации использует в качестве входных данных значения  $S$ ,  $b_{bp}(555)$  и  $n_p$ , найденные во 2-ой итерации. Таким образом, решением считается набор  $IOPs$  после второго шага, если тип решения для первых двух итераций сохраняется, в противном случае ему соответствует набор  $IOPs$  после 3-ей итерации.

На рис. 1, а показаны модельные спектры  $R_{RS}(\lambda)$ , рассчитанные по усредненным спутниковым данным за первую половину октября 1997 г., в узле с координатами  $42,95^\circ$ с.ш. и  $35,60^\circ$ в.д., для трех последовательных шагов 1-ой итерации. Координаты совпадают с *in situ* измерениями 7 октября 1997 года [17]. Здесь же показаны спутниковые значения спектра  $R_{RS}(\lambda)$  в СК 412, 443, 490, 510 и 555 нм за первую половину октября 1997 г. для района *in situ* измерений, охватывающего три соседних узла сетки. Для восстановления модельного спектра во всем спектральном диапазоне от 400 до 700 нм использовались выражения и константы, описанные в табл. 1 из работы [24] для EM2-модели (*Exact model 2* – точная модель 2) и табл. П2 из Приложения.

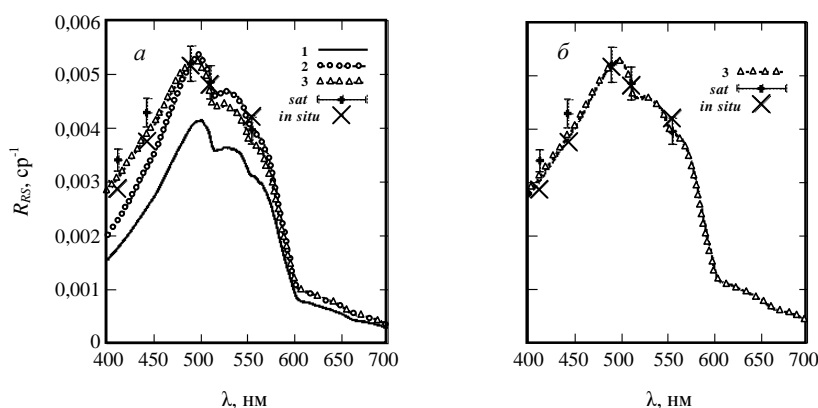


Рис. 1. Примеры модельных спектров  $R_{m,RS}(\lambda)$  и их сравнение с *in situ* [17] и спутниковыми (*sat*) измерениями  $R_{s,RS}(\lambda)$ : а – эволюция модельного спектра  $R_{m,RS}(\lambda)$  для трех последовательных шагов 1-2-3 первой итерации (см. таблицу); б – модельный спектр  $R_{m,RS}(\lambda)$ , восстановленный по данным  $IOPs$ , после третьей итерации.

Первое, в данном конкретном случае видно, что уже после первой итерации модельный спектр  $R_{m,RS}(\lambda)$  хорошо количественно совпадает со спектром, измеренным *in situ*.

Таблица 1. Описание трех последовательных шагов одной итерации.

Условный номер шага	Входные данные	Выходные данные	Метод решения
1	$I_s(490), I_s(510)$	$a_{CDM}(490), C_a,$ <i>тип решения</i>	490,510 $\min_{a_{CDM}(490), C_a, \text{type of decision}} \sum_{\lambda} [I_s(\lambda) - I_m(\lambda)]^2$
2	$R_{RS,s}(490), R_{RS,s}(555),$ $a_{CDM}(490), C_a,$ <i>тип решения</i>	$b_{br}(555),$ $n_p$	490,555 $\min_{b_{br}(555), n_p} \sum_{\lambda} [R_{s,RS}(\lambda) - R_{m,RS}(\lambda)]^2$
3	$I_s(412),$ $a_{CDM}(490), C_a,$ $b_{br}(555), n_p,$ <i>тип решения</i>	$S$	412 $\min_S \sum_{\lambda} [I_s(\lambda) - I_m(\lambda)]^2$

Примечание. Индексы  $s$  и  $m$  означают спутниковые и модельные данные соответственно, модельные данные рассчитывались по формулам, приведенным в Приложении.

Второе, близкие значения спутникового спектра  $R_{s,RS}(\lambda)$  и *in situ*  $R_{RS}(\lambda)$  указывает на удовлетворительное качество атмосферной коррекции в данной конкретной точке с учетом перечисленных выше критериев браковки спутниковых данных.

### Результаты.

#### Примеры карт: 2-х недельная карта

На рис. 2 приведен пример восстановления полей *IOPs* за первую половину июня 2003 года. Очевидно, что высокой корреляции между картами нет. Все поля выглядят как независимые. Поле  $S_a$  в целом имеет низкие значения от  $0,1 \text{ мг м}^{-3}$  до  $0,3 \text{ мг м}^{-3}$ , что характерно для летнего периода времени. Исключения составляют районы вблизи устьев рек на северо-западном шельфе, вдоль западного побережья и Азовского моря, где  $S_a$  возрастают до  $1 - 10 \text{ мг м}^{-3}$  и выше. Поле  $n_p$  – однородное, за исключением северо-западного шельфа, где наблюдаются максимальные и минимальные значения. Области максимальных значений  $n_p \sim 3,0$  отмечаются около устьев рек, наибольшая по площади – в районе устья Дуная, что может быть связано с доминированием мелкой взвеси. Низкие значения  $n_p \sim 0,5$  характерны для центральной и восточной частей северо-западного шельфа, что вероятно является следствием доминирования крупных видов фитопланктона.

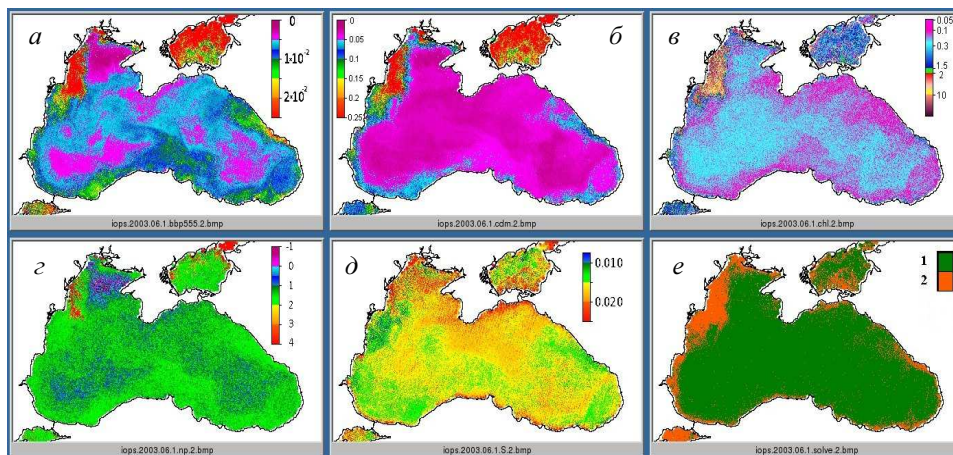


Рис. 2. Пример карт *IOPs* за первую половину июня 2003 г.: *a* –  $b_{bp}(555)$ ,  $\text{м}^{-1}$ ; *б* –  $a_{CDM}(490)$   $\text{м}^{-1}$ ; *в* –  $S_a$ ,  $\text{мг м}^{-3}$ ; *г* –  $n_p$  безразмерная; *д* –  $S$ ,  $\text{нм}^{-1}$ ; *е* – тип решения, безразмерный.

В глубоководной части моря величина  $S$  изменяется от  $0,015 \text{ нм}^{-1}$  до  $0,020 \text{ нм}^{-1}$ , в некоторых, в основном в прибрежных районах,  $S > 0,020 \text{ нм}^{-1}$ . По относительно высоким значениям  $S$  прослеживаются выносы вод из Азовского моря. Особенности поля  $a_{CDM}(490)$  четко связаны с близостью устьев рек и берегов. Поле  $b_{bp}(555)$  является хорошим индикатором цветения кокколитофорид в глубоководной части Черного моря, особенно во второй половине мая и в первой половине июня [25]. Однако в 2003 году цветение было слабым ( $b_{bp}(555) \sim 0,010 \text{ м}^{-1} - 0,015 \text{ м}^{-1}$ ) и наблюдалось около турецкого и кавказского побережья. Наиболее высокие значения  $b_{bp}(555)$

наша модель дает в районе устья Дуная ( $> 0,025 \text{ м}^{-1}$ ). Региональный алгоритм [6] имеет два типа решения, условно названных «Deep-» и «Shelf-» решение. Deep-решение используется для глубоководной части моря, Shelf-решение – для узкой полосы около берега. Это типичная ситуация, именно поэтому они и получили такое название. Но могут быть исключения (см. полный набор карт в [26]). Однако этот вопрос здесь более подробно рассматриваться не будет.

*Примеры карт: средняя многолетняя карта.*

На рис. 3 приведен пример средних многолетних карт *IOPs* за вторую половину марта. Карты параметров  $b_{bp}$  (555),  $n_p$  и  $a_{CDM}$  (490) очень похожи друг на друга, а именно: низкие значения наблюдаются в глубоководной части моря, а высокие – вблизи берега с максимумом в районах устьев рек. Только карты  $S_a$  и  $S$  имеют свои специфические особенности: повышенные значения  $S_a$  в центре моря по сравнению с периферией, что связано с цветением фитопланктона в начале весны. В летнее время характер пространственного распределения максимального и минимального  $S_a$  соответствует полям  $b_{bp}$  (555),  $n_p$  и  $a_{CDM}$  (490)<sup>1</sup>. Для распределения параметра  $S$  в глубоководной части моря характерны более низкие значения в западной части по сравнению с восточной. Эта особенность отмечена не только для рассматриваемого месяца, а в целом для всех сезонов – см. в [27]. Кроме того, имеет место сезонный ход  $S$  с летним минимумом в глубоководной части моря<sup>2</sup>, который согласуются с ранее полученными оценками [28].

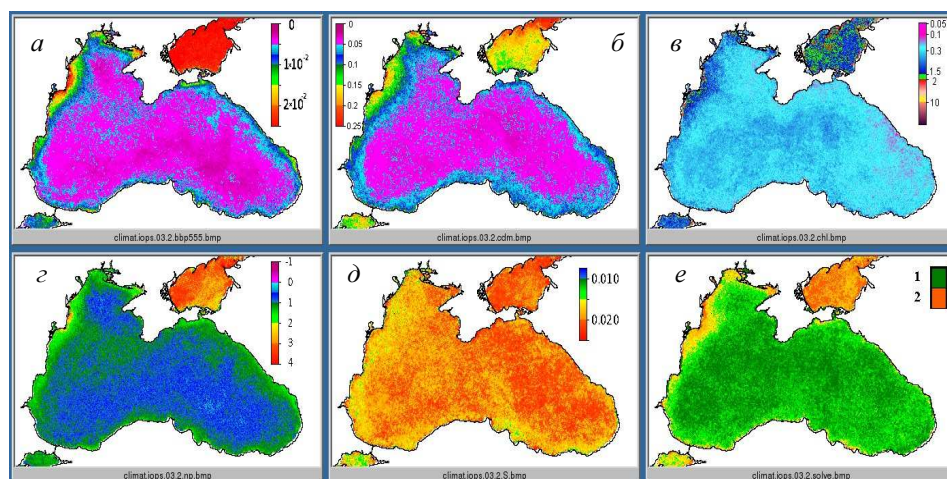


Рис. 3. Пример климатических карт *IOPs* за вторую половину марта, осредненных за весь период работы *SeaWiFS*. Порядок карт такой же как на рис. 2.

<sup>1</sup> С целью сокращения объема статьи мы соответствующий рисунок не приводим.

<sup>2</sup> С целью сокращения объема статьи мы соответствующий график здесь не приводим.

### Функциональные связи между отдельными элементами $IOPs$ .

Рассмотрим функциональные связи между отдельными элементами  $IOPs$ . Результаты представлены в виде графиков и получены для шести районов (см. раздел «Материалы») Черного моря по данным с двухнедельным осреднением за весь период работы цветкового сканера *SeaWiFS* с сентября 1997 года по декабрь 2010 года. Как видно из рис. 4,  $a$ , диапазон изменчивости  $n_p \in -0,5 \div 2,0$  и  $S \in 0,010 \div 0,045 \text{ нм}^{-1}$  в Черном море ограничен областью, похожую в выбранных координатах на «четырёхугольник».

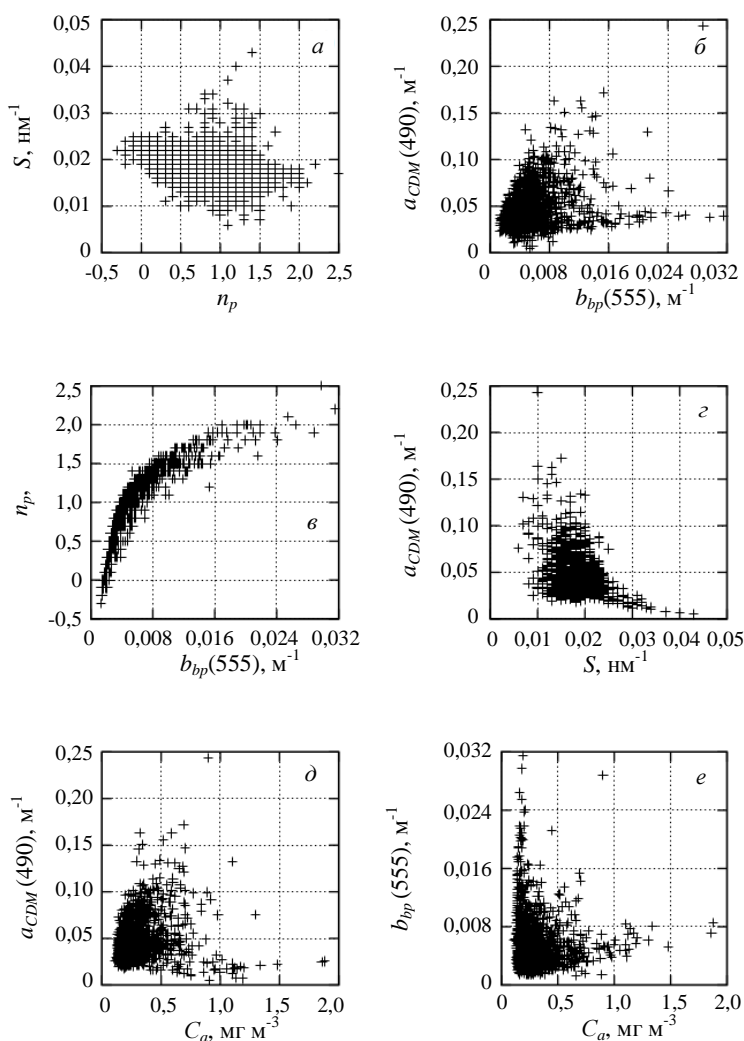


Рис. 4. Связи между  $IOPs$ :  $a - n_p$  и  $S$ ;  $б - b_{bp}(555)$  и  $a_{CDM}(490)$ ;  $в - b_{bp}(555)$  и  $n_p$ ;  $з - S$  и  $a_{CDM}(490)$ ;  $д - C_a$  и  $a_{CDM}(490)$ ;  $е - a_{CDM}(490)$  и  $b_{bp}(555)$  в шести районах (в пяти глубоководных и одном на северо-западном шельфе) Черного моря за весь период работы *SeaWiFS* с сентября 1997 г. по декабрь 2010 г. по данным с двухнедельным осреднением.



Анализ положения точек в этих координатах будет дан ниже. Здесь отметим лишь то, что параметры  $n_p$  и  $S$ , в отличие от остальных  $IOPs$ , отражают качественные (размерную структуру частиц и их особенности поглощения), а не количественные (концентрации взвешенных или растворенных веществ) характеристики оптически активных компонент морской среды.

Функциональные связи на рис. 4 б, д, е образуют «кометы», т. е. демонстрируют отсутствие однопараметрической связи между  $a_{CDM}(490)$ ,  $b_{bp}(555)$  и  $C_a$ , связанные с концентрациями оптически активных веществ, что является характерным признаком вод *case 2\** по Морелю [29]. В частности, для Черного моря для отдельных элементов  $IOPs$  это отмечалось в работах [3, 18].

На рис. 4, в представлена связь между параметрами  $IOPs$ , характеризующими рассеивающие свойства взвеси в заднюю часть индикатрисы. Как видно, она наиболее близка к однопараметрической, в которой большим значениям  $n_p$  соответствуют большие значения  $b_{bp}(555)$ , и наоборот. На рис. 4, з представлена функциональная связь для пары  $IOPs$ , описывающих поглощающие свойства оптически активных веществ в морской воде. Корреляция между  $a_{CDM}(490)$  и  $S$  низкая, «центр тяжести пятна» находится в точке  $a_{CDM}(490)=0,05 \text{ м}^{-1}$  и  $S = 0,018 \text{ нм}^{-1}$ .

На рис. 5, а показана изменчивость  $C_a$  в 1998 г. в 5-ом районе (см. раздел «Материалы») по *in situ* измерениям и результатам расчета  $IOPs$  по нашей методике. На рис. 5, б и в построены гистограммы по двухнедельным картам  $IOPs$  параметров  $S$  и  $a_{CDM}(440)$  за весь период работы *SeaWiFS*. Отметим, что диапазон изменчивости всех параметров – реальный. Характер сезонной изменчивости рассчитанных по нашей методике параметров  $IOPs$ , в частности,  $C_a$  [12, 13] (хотя значения для осени по-прежнему занижены), а так же средние значения  $S= 0,018 \text{ нм}^{-1}$  и  $0,020 \text{ нм}^{-1}$  для глубоководных и прибрежных районов соответственно по данным [14] и  $a_{CDM}(440) = 0,097 \pm 0,026 \text{ м}^{-1}$  и  $0,80 \pm 0,032 \text{ м}^{-1}$  для глубоководных и прибрежных районов соответственно по данным [30], не противоречат наблюдениям. Для других параметров  $IOPs$  их пространственная и сезонная изменчивость в Черном море мало изучена. Полученные здесь результаты, представленные в виде непрерывной многолетней серии карт [26], могут быть предметом изучения соответствующих специалистов.

**Особенности влияния оптически активных веществ на спектральные свойства первичных гидрооптических характеристик в Черном море.** Обнаружение и идентификация тех или иных видов фитопланктона по данным спутниковых измерений в видимом диапазоне спектра является актуальной научной задачей текущего момента. В настоящее время развиваются так называемые *PFT*-алгоритмы (*Phytoplankton Functional Types*) как глобальные [31 – 35], так и региональные [36]. Предлагаемый нами подход относится к региональному, т. к. развит для Черного моря. Его особенностью является то, что он не претендует на количественное описание в смысле концентраций (или процентного вклада в биомассу) тех или иных

---

\* См. список используемых аббревиатур в конце статьи.

видов фитопланктона. Используя связи между спектральными характеристиками  $IOPs$ , полученными по спутниковым данным, и отдельными видами фитопланктона наш подход позволяет идентифицировать последние в верхнем слое моря.

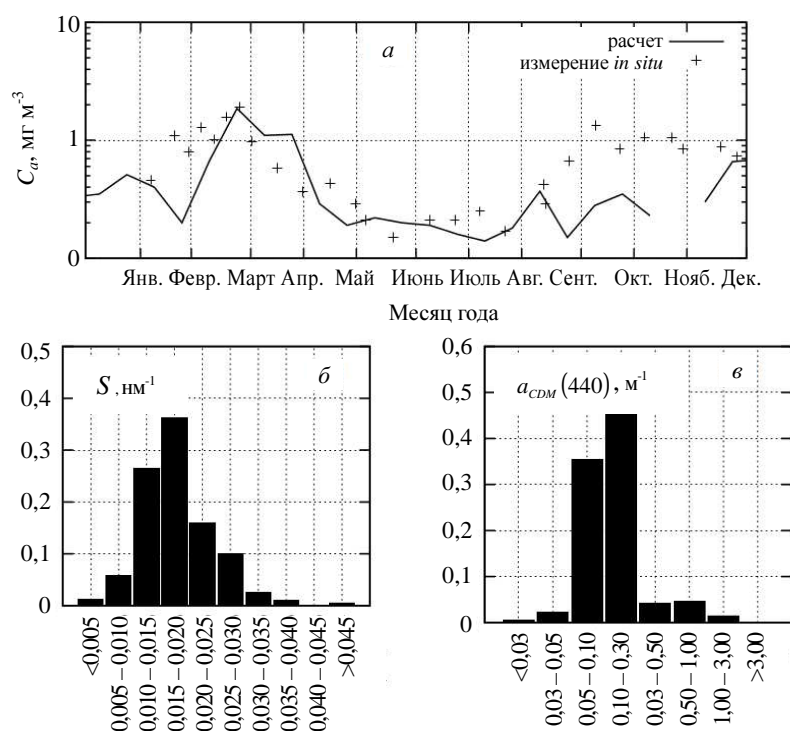


Рис. 5. Результаты сравнения расчетных значений  $IOPs$  с  $in\ situ$  измерениями  $C_a$  в пятом глубоководном районе в 1998 г. (а) и гистограммы  $S$ ,  $nm^{-1}$  (б) и  $a_{CDM}(440)$ ,  $m^{-1}$  (в) за весь период работы цветового сканера *SeaWiFS* по 2-х недельным картам  $IOPs$  ( $N = 12,8 \times 10^6$  точек).

В работе использованы результаты двухлетнего мониторинга видового состава фитопланктона в центральной западной части Черного моря (ЦЗЧ)  $42^{\circ}55' - 43^{\circ}10'$  с.ш. и  $30^{\circ}48' - 31^{\circ}08'$  в.д. [13].

Два параметра из набора  $IOPs$ , характеризующих спектральный наклон коэффициента обратного рассеяния света частицами взвеси  $n_p$  и суммарного коэффициента поглощения света неживым (окрашенная компонента растворенного органического вещества и детрит) веществом  $S$ , были выбраны в качестве индикаторов оптически активных компонент, содержащихся в морской воде.

Суть подхода, примененного в данной работе, заключается в том, чтобы в пространстве  $\{n_p, S\}$  найти односвязные области точек, соответствующие определенным оптически активным веществам. Для этого из массива  $in\ situ$  измерений выбирались только такие ситуации, когда:

а) процент вклада в суммарную биомассу ( $\delta$ ) одного из трех видов фитопланктона был больше 70% (см. рис. 4, а – диатомовые, см. рис. 4, б – динофлагелляты, см. рис. 4, в – кокколитофориды);

б) суммарная биомасса  $\delta$  двух из трех видов фитопланктона превышает 80% при условии, что  $\delta$  каждой из них меньше 70% (см. рис. 4, г – диатомовые и динофлагелляты, см. рис. 4, д – диатомовые и кокколитофориды, см. рис. 4, е – динофлагелляты и кокколитофориды).

Соответствующие им пары *IOPs*, в точках *in situ* измерений отображались на плоскости  $\{n_p, S\}$ . Для трех видов (диатомовых, кокколитофорид, динофлагеллят) фитопланктона всего таких комбинаций может быть шесть. Все они представлены на рис. 6.

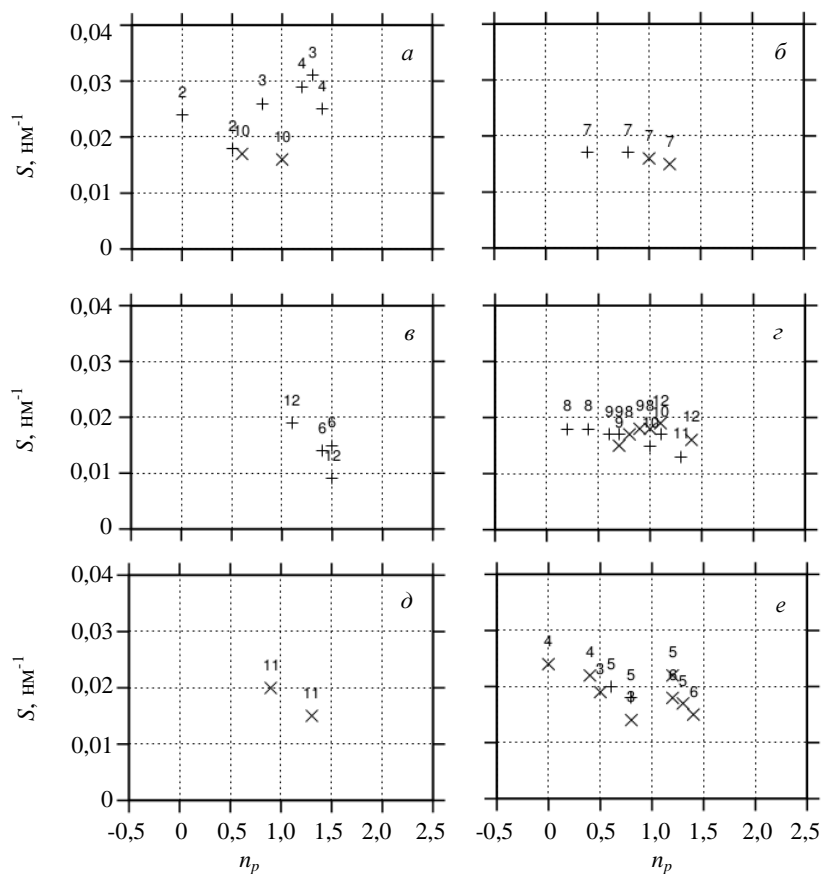


Рис. 6. Изменчивость спектральных характеристик *IOPs* в период с 1998 по 1999 гг. в ЦЗЧ. Цифрами обозначены номера месяцев года: (+) – 1998 г., (x) – 1999 г. Описание рисунков дано в тексте статьи.

Как видно из рис. 6, крайние левые и верхние области «четырёхугольника» связаны с доминированием микро-фитопланктона (диатомовых рис. 6, а, суммы диатомовых и динофлагеллят рис. 6, г и суммы динофлагеллят и кокколитофорид рис. 6, е). На рис. 6, е крайним левым точкам соответствует смесь, в которой  $\delta$  динофлагеллят составляет 50%.

Область крайних левых точек соответствует доминированию кокколитофорид (рис. 6, в, рис. 6, е). Таким образом, у нас выделились две размерные группы фитопланктона: микро- (левая и верхняя области «четырёхугольника») и нано- (область около правой его вершины). Однако есть основания полагать, что область, которую занимает микро-фитопланктон, можно разделить на две части: верхнюю и нижнюю. Как показано в работе (см. рис. 1, б в [6]), марту и апрелю 1998 года, а именно месяцы этого года отражены на рис. 6, а, наблюдается смена знака корреляции для отношений  $R_{RS}(555)/R_{RS}(510)$  и  $R_{RS}(510)/R_{RS}(490)$ , в то время как для остальных месяцев 1998 года и марта и апреля 1999 года знак этой корреляции положителен. Такое поведение отношений сигналов, выходящего из под воды излучения, авторы статьи [6] связали с поглощением особыми пигментами – фикобилинами, содержащимися в цианобактериях. Следуя этой работе, мы выделили эту группу точек (область вокруг верхнего угла «четырёхугольника») в отдельную группу и связали его с присутствием пико-фитопланктона (цианобактериями). Что касается нижнего угла «четырёхугольника», то его феноменологически мы связали с проявлением двух оптически активных компонент: детритом и/или изменением спектральных свойств поглощения света растворенным органическим веществом. Хорошо известно [14], что спектральный наклон коэффициента поглощения света детритом в Черном море  $\sim 0,010 \text{ nm}^{-1}$ . К сожалению, прямых экспериментальных доказательств связи между нижней вершиной «четырёхугольника» в пространстве  $\{n_p, S\}$  и этих оптически активных компонент у нас нет.

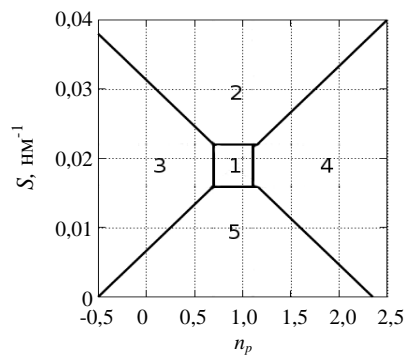


Рис. 7. Условное разбиение возможных реализаций  $IOPs$  в Черном море на пять кластеров в пространстве  $\{n_p, S\}$  как результат совместного анализа *in situ* и спутниковых данных: (1) – зона неоднозначности; (2) – пико-фитопланктон (предположительно цианобактерии); (3) – микро-фитопланктон (диатомовые, динофлагелляты или их смесь); (4) – нано- фитопланктон (кокколитофориды); (5) – детрит.

двухнедельным шагом по времени. Полный набор таких карт доступен в [37]. На рис. 8 на примере 1998 года приведены карты пространственно-временной изменчивости кластеров точек в пространстве  $\{n_p, S\}$  согласно табл. 2. Более

Окончательно результаты приведенного выше совместного анализа, формализованные с известной степенью условности, приведены в табл. 2 и на рис. 7. Где дополнительно возникла пятая область, точки которой нельзя однозначно связать с влиянием той или иной размерной группы фитопланктона или влиянием оптически активного вещества (детрит или деградирующая растворенная органика).

Основываясь на критериях, описанных в табл. 2, и используя карты  $n_p$  и  $S$ , полученные выше, были построены карты идентифицирующие микро-, нано- и пико-размерные группы фитопланктона и неживого оптически активного вещества (детрита и/или меняющей свои спектральные свойства окрашенной компоненты растворенной органики) за весь период работы цветового сканера *SeaWiFS* с

подробный анализ не является целью данной работы. Однако заметим, что по натурным данным [13] в глубоководном районе западной части моря в июне и декабре 1998 года доминировал нано-фитопланктон, что нашло отражение на рис. 8.

Таблица 2. Критерии разделения пространства  $\{n_p, S\}$  на пять кластеров.

№ кластера	Диапазон изменчивости $n_p$ и $S$	$T$	Код на карте (цвет)
1	$n_p \in [0,7; 1,1]$ $S \in [0,016; 0,022]$	область не определена	80 (синий)
2	$S > 0,022$ $S > -0,013 \cdot n_p + 0,031$ $S > 0,013 \cdot n_p + 0,0067$	пико-	16 (рубиновый)
3	$n_p < 0,7$ $S < -0,013 \cdot n_p + 0,031$ $S > 0,013 \cdot n_p + 0,0067$	микро-	130 (зеленый)
4	$n_p > 1,1$ $S > -0,013 \cdot n_p + 0,031$ $S < 0,013 \cdot n_p + 0,0067$	нано-	180 (желтый)
5	$S < 0,016$ $S < -0,013 \cdot n_p + 0,031$ $S < 0,013 \cdot n_p + 0,0067$	детрит	230 (красный)

Примечание.  $T$  – тип оптически активной компоненты в морской воде,  $S$  имеет размерность  $\text{нм}^{-1}$ ,  $n_p$  размерности не имеет (безразмерна).

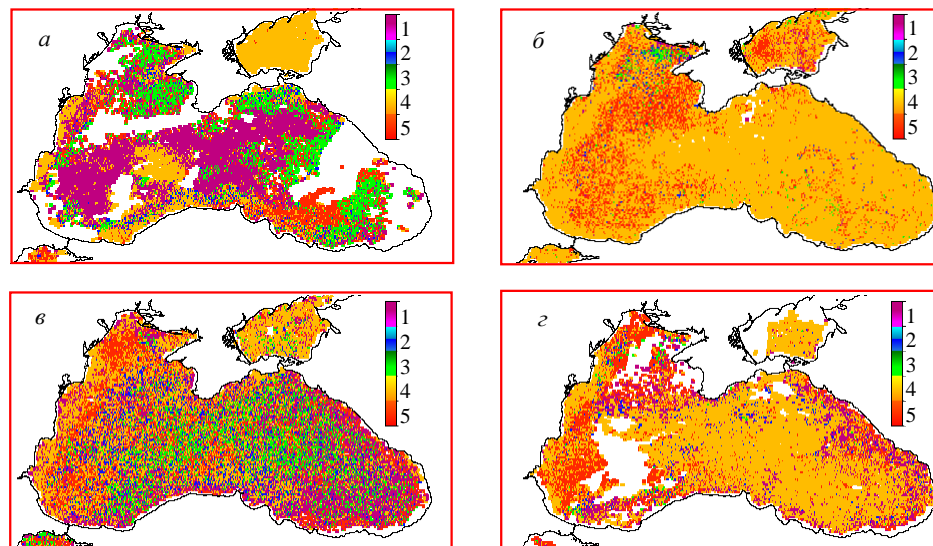


Рис. 8. Примеры карт пространственно-временной изменчивости пяти кластеров (см. рис. 7) на примере 1998 г. для разных сезонов: *a* – вторая половина марта; *б* – первая половина июня; *в* – вторая половина октября; *z* – вторая половина декабря. Обозначения кластеров: 1 – пико; 2 – не определен; 3 – микро; 4 – нано; 5 – детрит.

**Обсуждение.** Данную работу можно рассматривать как следующий шаг в восстановлении *IOPs* по сравнению с работой [6].

Прогресс состоит в следующем.

Во-первых, был расширен набор восстанавливаемых параметров *IOPs* по спутниковым данным, т. к. при нахождении решения используется информация обо всем спектре  $R_{RS}(\lambda)$ , восстановленном по спутниковым данным.

Во-вторых, была применена последовательная 3-х ступенчатая процедура нахождения *IOPs*, которая позволила повысить устойчивость решения.

В-третьих, удалось добиться единственности решения, при описанном выше способе его нахождения, чего не было ранее из-за пересечения *Deep*- и *Shelf*-решений в пространстве отношений  $R_{RS}(\lambda)$ .

Однако все еще остаются нерешенные проблемы.

Первая – по-прежнему постулируются только два типа решений (условно называемых *Deep*- и *Shelf*-), каждый из которых определяется своим фиксированным набором  $k(\lambda)$  (см. табл. П2 в Приложении). По сути  $k(\lambda)$  является функцией качественного и количественного набора пигментов фитопланктона. Но так как видовой состав фитопланктона в верхнем слое моря имеет сезонную и пространственную изменчивость, то это, вообще говоря, должно приводить к изменчивости,  $k(\lambda)$  и она так же должна быть функцией времени и пространства. Поэтому использование нами только двух фиксированных решений можно рассматривать как первое приближение на пути решения задачи восстановления *IOPs*.

Вторая – остается противоречие между экспериментально наблюдаемыми значениями  $k(\lambda)$  и теми значениями, которые используются нами в модели. Наш выбор  $k(\lambda)$  решен в пользу «нефизических» значений  $k(\lambda)$ , согласованных с моделью наблюдаемых спутниковых значений индексов  $I(\lambda)$ <sup>1</sup> в пространстве  $\{I(510), I(490)\}$ .

**Выводы.** Впервые для Черного моря получен набор *IOPs* в виде карт с двухнедельным осреднением на 4-х км сетке, включающий  $\{b_{bp}(555), a_{CDM}(490), C_a, n_p, S\}$ , как результат обработки данных цветового сканера *SeaWiFS* за период с сентября 1997 года по декабрь 2010 года. Полный набор карт доступен на сайте [26].

Было показано, что в общем случае отсутствует значимая корреляция не только между коэффициентом обратного рассеяния взвесью и суммарным коэффициентом поглощения детрита и растворенного органического вещества, но и концентрацией хлорофилла-«а» и суммарным коэффициентом поглощения детрита и растворенного органического вещества, что подтверждает тезис о том, что оптические свойства вод Черного моря принадлежат к *case 2*.

Впервые для обнаружения оптически активных веществ, включая различные таксономические группы фитопланктона, был обоснован и применен выбор пары *IOPs* параметров  $n_p$  и  $S$ .

---

<sup>1</sup> Определение  $I(\lambda)$  дано в табл. П1 Приложения.

Построена серия карт с двухнедельным шагом за период с сентября 1997 года по декабрь 2010 года, на которых идентифицируются четыре типа оптически активных веществ в Черном море: три различных таксономических группы фитопланктона (пико-, нано- и микро-) и высокомолекулярное неживое органическое вещество.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность группе обработки данных о цвете океана *NASA GSFC* [22]. Данная работа частично финансировалась из проекта Национальной Академии Наук Украины «Фундаментальные проблемы оперативной океанографии» и международных проектов: украинско-российского проекта «Черное море как имитационная модель Мирового океана», европейских проектов «MyOcean2» P-400a/MyO2\_CA\_20110802, «*PERSEUS*» Grant agreement № 287600, «*ODEMM*» (FP7 № 244273) и FP 7 *DEVOTES*.

#### СПИСОК АББРЕВИАТУР

*IOPs* – *Inherent Optical Properties* (первичные гидрооптические характеристики);  
*SeaWiFS* – *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (прибор наблюдения морских цветовых полей);  
*in situ* – результат измерения в данном месте в данное время (здесь и сейчас);  
*SeaDAS* – *SeaWiFS Data Analysis System* (пакет прикладных программ обработки результатов спутниковых измерений);  
*case 2* – второй тип вод по Морелю [29].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копелевич О.В.* Экспериментальные данные об оптических свойствах морской воды // *Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана* (ред. А.С. Монин). – М.: Наука, 1983. – С. 166-208.
2. *Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications.* Lee, Z.-P. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, 2006, No. 5, IOCCG, Dartmouth, Canada. 122 p.
3. *Суетин В.С., Суслин В.В., Королев С.Н., Кучерявый А.А.* Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море по данным спутникового прибора *SeaWiFS* // *Морской гидрофизический журнал.* – 2002. – № 6. – С. 44-54.
4. *Шибанов Е.Б., Корчемкина Е.Н.* Региональный аналитический алгоритм восстановления первичных гидрооптических характеристик морской воды по данным коэффициента яркости // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: НПИЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2007. – Вып. 15. – С. 397-404.
5. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V. et al.* Application of *SeaWiFS* data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // *Deep-Sea Res. Part II: Topical Studies in Oceanography.* – 2004. – Vol. 51, iss. 14 – 16. – P. 1063-1091.
6. *Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М.* Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла *a* в Черном море по спутниковым данным *SeaWiFS* // *Морской экологический журнал.* – 2008. – № 2. – С. 24-42.
7. *Berthon J., Zibordi G., Canuti E., Jankowski L.* Variability of the inherent optical properties in european coastal waters inferred from the BIOMAP data set: application

- to a semi-analytical ocean colour inversion algorithm // OOXXI, 2012, UK, Glasgow, 8-12 October, 2012. <http://oceanopticsconference.org/abstracts/all>.
8. *Кортаев Г.К., Хоменко Г.А., Шами М. и др.* Международный подспутниковый эксперимент на океанографической платформе (пос. Качивели) // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 5. – С. 28-38.
  9. *Ведерников В.И., Демидов А.Б.* Вертикальное распределение первичной продукции и хлорофилла в различные сезоны в глубоководной части Черного моря // Океанология. – 1997. – Том 37, № 3. – С. 414-423.
  10. *Берсенева Г.П., Чурилова Т.Я.* Хлорофилл и оптические характеристики фитопланктона в шельфовых водах Черного моря у побережья Крыма // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 2. – С. 44-58.
  11. *Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П., Георгиева Л.В., Брянцева Ю.В.* Биооптические характеристики фитопланктона Черного моря в период зимне-весеннего «цветения» // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 5. – С. 28-40.
  12. *Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П.* Поглощение света взвешенным веществом, фитопланктоном, детритом и растворенным органическим веществом в прибрежном районе Крыма (июль-август 2002) // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 4. – С. 39-50.
  13. *Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П., Георгиева Л.В.* Изменчивость био-оптических характеристик фитопланктона в Черном море // Океанология. – 2004. – Том 44, № 2. – С. 208-221.
  14. *Churilova T.Ya., Suslin V.V., Berseneva G.P., Pryahina S.F.* Parametrization of light absorption by phytoplankton, non-algal particles and coloured dissolved organic matter in the Black Sea // Current Problems in Optics of Natural Waters: Proc. 4th Int. Conf. (Nizhny Novgorod, September 11 – 15, 2007). – Nizhny Novgorod. – 2007. – P. 70-74.
  15. *Шибанов Е. Б., Корчемкина Е. Н.* Восстановление биооптических характеристик вод Черного моря при условии постоянства коэффициента яркости на длине волн 400 нм // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 1. – С. 38-50.
  16. Сайт «SeaWiFS Bio-optical Archive and Storage System» (SeaBASS). [Электронный ресурс]. <http://seabass.gsfc.nasa.gov> (Последнее обращение 15.10.2012).
  17. *Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Ведерников В.И.* Подспутниковые измерения цвета океана: верификация спутниковых данных сканера цвета SeaWiFS // Океанология. – 2000. – Том 40, № 3. – С. 357-362.
  18. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V.* Case Studies of Optical Remote Sensing in the Barents Sea, Black Sea, and Caspian Sea / In: Remote Sensing of the European Seas, Vittorio Barale, Martin Gade, (Eds.). – Springer, 2008. – P. 53-66.
  19. *Суетин В.С., Королев С.Н., Суслин В.В., Кучерявый А.А.* Проявление особенностей оптических свойств атмосферного аэрозоля над Черным морем при интерпретации данных спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 1. – С. 69-79.
  20. *Суетин В.С., Королев С.Н., Суслин В.В., Кучерявый А.А.* Проявления пылевого аэрозоля в результатах оптических наблюдений Черного моря из космоса // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – Вып. 16. – С. 202-211.
  21. Сайт «Ocean Color». Level3 flags & masks. [Электронный ресурс]. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/VALIDATION/flags.html> (Последнее обращение 10.09.2012).



22. *Feldman G.C., McClain C.R.* Ocean Color Web, SeaWiFS Reprocessing R2009.1, NASA Goddard Space Flight Center. Eds. Kuring, N., Bailey, S.W. [Электронный ресурс]. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> (Последнее обращение 15.09.2012).
23. Сайт «Ocean Color». SeaDAS [Электронный ресурс]. <http://seadas.gsfc.nasa.gov/> (Последнее обращение 15.09.2012).
24. *Суслин В.В., Чурилова Т.Я.* Упрощенный метод расчета спектрального диффузного коэффициента ослабления света в верхнем слое Черного моря на основе спутниковых данных // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2010. – Вып. 22. – С. 47-60.
25. *Suslin V.V., Ananchenko A., Vekshin E.* Variability of spectral properties of backscattering coefficient during coccolithophore bloom in open part of the Black Sea // Current Problems in Optics of Natural Waters: Proc. 2nd Int. Conf. (St. Petersburg). – 2003. – P. 241-244.
26. Сайт «Black Sea Color Web Site». Bi-weekly Black Sea IOPs maps. [Электронный ресурс]. <http://blackseacolor.com/browser12.html> (Последнее обращение 14.06.2012).
27. Сайт «Black Sea Color Web Site». Climatic Black Sea IOPs maps. [Электронный ресурс]. <http://blackseacolor.com/browser14.html> (Последнее обращение 14.06.2012).
28. *Suslin V.V., Churilova T.Ya., Pryahina S.F.* Seasonal variability of the slope in absorption spectra of color detrital matter in the deep part of the Black Sea based on SeaWiFS and MODIS data sets // Current Problems in Optics of Natural Waters: Proc. 5th - Int. Conf. (St. Petersburg). – 2009. – P. 136-138.
29. *Morel A., Prieur L.* Analysis of variations in ocean color // Limnol. Oceanog. – 1977. – Vol. 22, № 4. – P. 709-722.
30. *Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Рылькова О.А.* Параметризация поглощения света основными оптически активными компонентами в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – Вып. 16. – С. 190-201.
31. *Kostadinov T.S., Siegel D.A., Maritorena S.* Retrieval of particle size distribution from satellite ocean color observations // J. Geophys. Res. – 2009. – Vol. 114, C09015, doi:10.1029/2009JC005303.
32. *Kostadinov T., Siegel D., Maritorena S.* Remote Assessment of Phytoplankton Functional Types Using Retrievals of the Particle Size Distribution from Ocean Color Data. Сайт «Ocean Color». [Электронный ресурс]. [http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/MEETINGS/OCRT\\_May2010/Kostadinov\\_OCRT\\_2010\\_v3.ppt](http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/MEETINGS/OCRT_May2010/Kostadinov_OCRT_2010_v3.ppt) (Последнее обращение 10.10.2012).
33. *Alvain S., Moulin C., Dandonneau Y., Bréon F.M.* Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery. Part I // Deep Sea Res. – 2005. – Vol. 52. – P. 1989-2004, doi:10.1016/j.dsr.2005.06.015.
34. *Alvain S., Moulin C., Dandonneau Y., Loisel H.* Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view // Global Biogeochem. Cycles. – 2008. – Vol. 22, GB3001, doi:10.1029/2007GB003154.
37. Сайт «Ocean Color». [Электронный ресурс] [http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/MEETINGS/OCRT\\_May2010/Kostadinov\\_OCRT\\_2010\\_v3.ppt](http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/MEETINGS/OCRT_May2010/Kostadinov_OCRT_2010_v3.ppt) (Последнее обращение 12.05.2011).
36. *Bricaud A., Ciotti A.M., Gentili B.* Spatial-temporal variations in phytoplankton size and colored detrital matter absorption at global and regional scales, as derived from

twelve years of SeaWiFS data (1998-2009) // Global Biogeochemical Cycles. – 2011. – Vol. 26, GB1010, doi:10.1029/2010GB003952.

37. *Caïm* «Black Sea Color Web Site». Black Sea BIO maps. [Электронный ресурс]. half-monthly <http://blackseacolor.com/browser16.html>, half-monthly climatology <http://blackseacolor.com/browser15.html> (Последнее обращение 15.07.2012).

Матеріал поступил в редакцию 25.10.2012 г.

**АНОТАЦІЯ** Описується алгоритм відновлення первинних гідрооптичних характеристик Чорного моря, *IOPs*, за даними колірною сканеру *SeaWiFS*  $b_{bp}(\lambda)$  – коефіцієнта зворотного розсіяння світла суспензією на довжині хвилі 555 нм,  $n_p$  – показника спектрального ходу  $b_{bp}(\lambda)$ ,  $a_{CDM}(\lambda)$  – сумарного коефіцієнту поглинання світла розчиненою органікою і неживою суспензією на довжині хвилі 490 нм,  $S$  – показника спектрального ходу  $a_{CDM}(\lambda)$ ,  $C_a$  – концентрації хлорофілу-«a». Для спільного аналізу супутникових даних про колір води притягувалися *in situ* виміри біо-оптичних характеристик фітопланктону, отримані за результатами дворічного моніторингу в західній частині Чорного моря. Виявлені прояви як мінімум чотирьох цікавих ситуацій, пов'язаних з (1) зміною величини нахилу спектрального коефіцієнта поглинання неживою органічною речовиною, (2) цвітінням кокколитофорид, (3) домінуванням крупного фітопланктону, (4) присутністю піко-планктону. Наводяться приклади просторового розподілу і тимчасової динаміки цих особливостей.

**ABSTRACT** A regional algorithm of the inherent optical properties, *IOPs*, such as particle backscattering coefficient at 555 nm, spectral slope of particle backscattering coefficient, absorption coefficient of sum of colored dissolved organic matter and non-algal particles at 490 nm, spectral slope of absorption coefficient of colored detrital matter, and chlorophyll *a* concentration derived from *SeaWiFS level-2* data, after proper flag/mask and spatial/temporal binning procedures, has been developed. For joint analysis, the *in situ* measurements of bio-optical characteristics of phytoplankton during two-year monitoring in western part of the Black Sea and *IOPs* data set were used. At least four interesting situations related to (1) colored dissolved organic matter and/or detritus impact, (2) coccolithophorid blooms, (3) micro-size phytoplankton (diatoms and/or dinoflagellates), (4) cyanobacterias. Examples of the spatial distribution and seasonal variability of these features in half-monthly and half-month climatology maps are given. A complete set of maps during *SeaWiFS* lifetime is available from <http://blackseacolor.com/>. Thus, under certain conditions, a set of points in two-dimensional space of the spectral slopes identifies the optically active substances contained in seawater, in particular, the different types of phytoplankton.

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА МОДЕЛЬНЫХ И СПУТНИКОВЫХ  
ЗНАЧЕНИЙ  $I(\lambda)$  И  $R_{RS}(\lambda)$

В табл. П1 дано определение индекса для разных спектральных каналов цветового сканера *SeaWiFS*

Таблица П1. Соответствие обозначения индекса  $I(\lambda)$

отношению $\frac{nLw(\lambda_0)}{nLw(\lambda)}$ .			
Индекс, $I(\lambda)$	$I(412)$	$I(490)$	$I(510)$
$\frac{nLw(\lambda_0)}{nLw(\lambda)}$	$\frac{nLw(443)}{nLw(412)}$	$\frac{nLw(510)}{nLw(490)}$	$\frac{nLw(555)}{nLw(510)}$

$$nLw(\lambda) = F_0(\lambda) \cdot R_{RS}(\lambda),$$

где  $nLw(\lambda)$  – нормализованная яркость излучения, выходящая из-под поверхности воды, на длине волны  $\lambda$ ;  $R_{RS}(\lambda)$  – коэффициент яркости моря на длине волны  $\lambda$ ;  $F_0(\lambda)$  – солнечная постоянная на длине волны  $\lambda$  [П1].

$$R_{RS} = \frac{0,518 \cdot r_{RS}}{1 - 1,562 \cdot r_{RS}}$$

$$r_{RS} = 0,0949 \cdot u + 0,0794 \cdot u^2,$$

где  $r_{RS}$  – коэффициент диффузного отражения моря,  $u = \frac{b_b}{b_b + a}$ ,  $b_b$  – суммарный коэффициент обратного рассеяния света морской водой,  $a$  – суммарный коэффициент поглощения света морской водой, все характеристики являются функцией  $\lambda$ .

Согласно [П2] выражение для  $b_b$  имеет следующий вид

$$b_b = b_{bw} + b_{bp},$$

где  $b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^{n_p}$  – коэффициент обратного рассеяния света частицами взвеси,  $n_p > 0$  – показатель спектрального наклона для  $b_{bp}(\lambda)$ ,  $\lambda_0 = 555$  нм,  $b_{bw}$  – коэффициент обратного рассеяния света чистой морской водой [П3].

Аналогично  $a$  так же представляется как сумма из трех оптически активных компонент

$$a = a_w + a_{CDM} + a_{ph},$$

где  $a_w$  – коэффициент поглощения света чистой морской водой считался

только функцией  $\lambda$  и брался из [П4];  $a_{CDM}$  – суммарный коэффициент поглощения света окрашенной компонентой растворенного органического вещества и неживой взвесью,  $a_{ph}$  – коэффициент поглощения света фитопланктоном.

Спектральная зависимость  $a_{CDM}(\lambda)$  относительно опорной длины волны задавалась следующим выражением

$$a_{CDM}(\lambda) = a_{CDM}(\lambda_0) \cdot \exp[-S \cdot (\lambda - \lambda_0)],$$

где  $\lambda$  – длина волны в нм,  $\lambda_0 = 490$  нм,  $S > 0$  – показатель спектрального наклона в  $\text{нм}^{-1}$ .

Для описания спектральной зависимости  $a_{ph}$  был введен коэффициент пропорциональности  $k(\lambda)$ , зависящий от длины волны и типа решения [П5] (см. табл. П2), как  $a_{ph}(\lambda) = k(\lambda) \cdot a_{ph}(\lambda_0)$ , где  $\lambda_0$  – опорная длина волны, равная 490 нм. По определению  $k(490) = 1$ . Для  $\lambda < 500$  нм значения  $a_{ph}(\lambda)$  брались из [П6].

Таблица П2. Значения коэффициента  $k(\lambda)$  для двух типов решений (*Deep*- и *Shelf*-) согласно результатам, полученным в [6].

$\lambda$ , нм		412	443	490	510	555
$k(\lambda)$	<i>Deep</i>	1,34	1,43	1	0,7	1,2
	<i>Shelf</i>				0,88	0,5

Для перехода от  $a_{ph}(490)$  к концентрации хлорофилла-«а» ( $C_a$ ,  $\text{мг м}^{-3}$ ) использовалось выражение  $a_{ph}(490) = A \cdot C_a$ , где  $A = 0,0274 \text{ м}^2 \text{ мг}^{-1} C_a$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- П1. *Thuillier G., Hers M., Simon P.C., Labs D., Mandel H., Gillotay D., Foujols T.* The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS 1-2-3 and EURECA missions. // *Solar Physics*. – 2003. – Vol. 214, № 1. – P. 31-22.
- П2. *Копелевич О.В.* Экспериментальные данные об оптических свойствах морской воды // *Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана* (ред. А.С. Мони́н). – М.: Наука, 1983. – С. 166-208.
- П3. *Smith R.C., Baker K.S.* Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm) // *Appl. Opt.* – 1981. – Vol. 20. – P. 177-184.
- П4. *Pope R.M., Fry E.S.* Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Appl. Opt.* – 1997. – Vol. 36. – P. 8710-8723.
- П5. *Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М.* Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла *a* в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS // *Морской экологический журнал*. – 2008. – № 2. – С. 24-42.
- П6. *Bricaud A., Babin M., Morel A. et al.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // *Journ. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100, № C7. – P. 13321-13332.