

В.В.Суслин*, Т.Я.Чурилова**, А.А.Джулай**,
С.Мончева***, В.Слабакова***, О.В.Кривенко**,
Т.В.Ефимова**, П.А.Салюк****

*Морской гидрофизический институт, г.Севастополь

**Институт биологии южных морей, г.Севастополь

***Институт океанологии БАН, г.Варна, Болгария

****Тихоокеанский океанологический институт им.В.И.Ильичева,
ФВО РАН, г.Владивосток

**РЕГИОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
ХЛОРОФИЛЛА «А» И КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА
НЕЖИВЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ ВЕЩЕСТВОМ
НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 490 НМ В ЧЕРНОМ МОРЕ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ
КАНАЛОВ ЦВЕТОВЫХ СКАНЕРОВ MODIS И MERIS**

Представлена модификация регионального алгоритма [1] для спектральных каналов цветковых сканеров MODIS и MERIS. Сравнение результатов модельных расчетов концентрации хлорофилла «а» и коэффициента поглощения света неживым органическим веществом на длине волны 490 нм с измерениями *in situ* показало удовлетворительное соответствие. Построены двухнедельные карты этих продуктов, начиная с сентября 1997 г. по настоящее время, в которых использованы данные сканеров SeaWiFS, MODIS и MERIS.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: региональный алгоритм, концентрация хлорофилла а, поглощение неживым органическим веществом, SeaWiFS, MODIS, MERIS, Черное море.

Вопрос о причинах глобальных и региональных климатических изменений, а также их последствиях занимает умы человечества последнее столетие [2]. Понимание процессов, контролирующих круговорот веществ в природе, источники и стоки энергии, является ключевым звеном решения этой проблемы. Особое значение имеют представления о количественных закономерностях трансформации соединений углерода в процессах синтеза органического вещества и его деструкции. Мировому океану принадлежит главенствующая роль в формировании бюджета углерода и других биогенных элементов на Земле. Мировой Океан является не только огромным резервуаром, но и биологической системой, обеспечивающей ассимиляцию неорганических соединений в процессе фотосинтеза, трансформацию вновь созданных органических веществ, их деструкцию и захоронение.

Современные спутниковые технологии позволяют проводить мониторинг всей водной поверхности Земли и восстанавливать спектральный состав света, восходящего из-под поверхности морской воды (R_{RS} – коэффициент яркости моря, sr^{-1}) [3]. Спектр последнего определяется как свойствами чистой воды, так и свойствами растворенных в ней веществ и взвешенных частиц, которые принимают участие в поглощении и рассеянии естественного света, прошедшего через толщу атмосферы [4]. Есть несколько способов восстановления концентрации этих веществ из спектра R_{RS} , среди них, анали-

© В.В.Суслин, Т.Я.Чурилова, А.А.Джулай, С.Мончева,
В.Слабакова, О.В.Кривенко, Т.В.Ефимова, П.А.Салюк, 2014

тические, квази-эмпирические, эмпирические и др. [5]. К наиболее распространенным относятся эмпирические и квази-эмпирические подходы. Первые в настоящее время применяются National Aeronautics and Space Administration (NASA) в оперативной обработке спутниковых данных [6]. Вторые, такие как Quasi-Analytical Algorithm (QAA) [7] и Semi-Analytical Bio-Optical Model Garver-Siegel-Maritorena (GSM) [8], используются в тестовом режиме [3].

В Черном море стандартный алгоритм [6] дает неудовлетворительную количественную оценку концентрации хлорофилла a (C_a) в летний период [9 – 11], а также характера его сезонного хода в целом [11]. На рис.1 показан пример сравнения величин C_a , полученных стандартным алгоритмом NASA по спутниковым данным цветового сканера Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS), и измеренными *in situ* в глубоководной части моря в 1998 г. ($42.92^\circ - 43.17^\circ$ с.ш. и $30.8^\circ - 31.13^\circ$ в.д.). Из рисунка хорошо видно, что летние спутниковые значения завышены относительно измерений *in situ*, а весеннее «цветение» (максимум C_a в марте) вовсе отсутствует.

Одна из причин заключается в повышенном содержании окрашенной компоненты растворенного органического вещества [9, 12] по сравнению с океанскими водами, по данным которых в основном был настроен стандартный эмпирический алгоритм NASA [6]. Другая причина состоит в неадекватном описании свойств атмосферного аэрозоля, которые используются при выполнении стандартной атмосферной коррекции [13 – 15]. В настоящее время этот недостаток пытаются устранить, используя одновременно измерения оптических свойств воды и атмосферы [16]. В Черном море такие измерения проводятся на болгарской платформе *Galata*. Указанные выше причины могут приводить к низкой точности восстановления спектра R_{RS} во всем видимом диапазоне. Причем точность снижается по мере уменьшения длины волны, что серьезно затрудняет применение алгоритмов, использующих спектральные каналы (СК) в синей части спектра [12, 17].

Отметим, что и квази-эмпирические алгоритмы NASA, такие как GSM [8] и QAA [7], также неудовлетворительно восстанавливают сезонный ход C_a . На том же рис.1 показано сравнение продукта QAA [7] с измерениями *in situ* [11]. Кроме того, среди стандартных продуктов NASA отсутствует такой как «поглощение света неживым органическим веществом». Этот продукт присутствует в экспериментальных алгоритмах GSM и QAA и, частично, в региональном алгоритме [18]. Но они не работают в Черном море. Причин этому несколько, некоторые из них упомянуты выше.

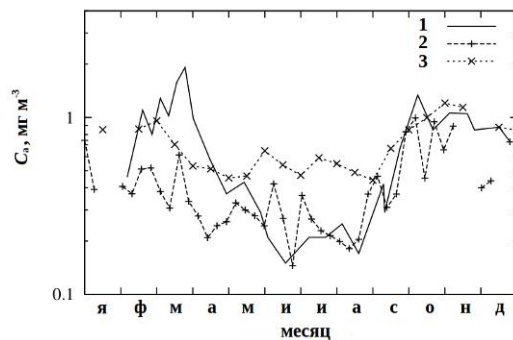


Рис. 1. Результаты сравнения величин концентрации хлорофилла a в глубоководной части Черного моря в 1998 г. по измерениям *in situ* (1) и восстановленным по спутниковым данным для разных моделей: QAA (2) и стандартный продукт NASA (3).

Глобальный стандартный алгоритм [6] и региональные алгоритмы для Черного моря [9, 10] имеют следующий вид

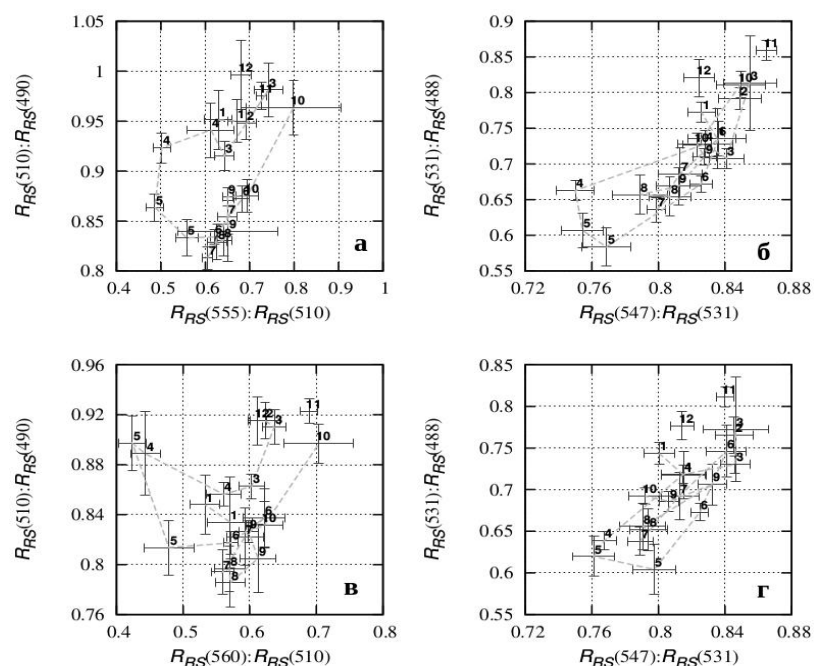
$$C_a = f(R_{RS}(\lambda_1):R_{RS}(\lambda_2)), \quad (1)$$

где $R_{RS}(\lambda)$ – коэффициент яркости моря на длине волны λ . Для длин волн больше 480 нм пигмент C_a не поглощает свет. Поэтому эмпирические алгоритмы типа (1), в которых используются СК с длинами волн больше 480 нм, исходят из существования жесткой связи между C_a и другими пигментами, входящими в состав фитопланктона. Причем, сезонными изменениями состава фитопланктона, как правило, пренебрегают. Начиная с 70-х гг. XX ст., сотрудники отдела оптики Морского гидрофизического института АН Украины использовали отношение выходящего из моря излучения на двух длинах волн как количественную характеристику суммарного поглощения света водой в разных частях Мирового океана [19]. Учитывая, что физический смысл отношения коэффициентов яркости моря в двух СК зависит главным образом от суммарного поглощения света морской водой, одного отношения для разделения компонент поглощения живой и неживой органикой $R_{RS}(\lambda_1):R_{RS}(\lambda_2)$ (или 2-х СК) явно не достаточно. Поэтому необходимо иметь как минимум два таких отношения, т.е. в терминах $R_{RS}(\lambda)$ минимальный набор должен содержать три СК.

Функциональная связь (1) реализуется только в случае однопараметрической связи между поглощением света живой (пигментами фитопланктона) и неживой (суммарного поглощения света взвешенным и растворенным органическим веществом, a_{CDM}) компонентами органического вещества, например, см. в [20]. В Черном море такая однопараметричность между отдельными компонентами отсутствует, на что указывает, например, петлеобразное поведение двух отношений коэффициентов яркости моря из диапазона длин волн от 480 до 570 нм в глубоководной части моря (43.2° с.ш. и 32.0° в.д.) в течение года (рис.2).

Задача разделения поглощения света живым и неживым органическим веществом для трех СК прибора *SeaWiFS* была выполнена в [1]. Задача, которая решается в настоящей работе, состоит в том, чтобы создать алгоритм разделения поглощения света в воде на две компоненты – неживым (CDM) и живым органическим веществом (фитопланктон) в Черном море для СК Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (*MODIS*) и Medium-spectral Resolution Imaging Spectrometer (*MERIS*). Причем, одним из основных требований является использование этого алгоритма для массовой обработки спутниковых продуктов R_{RS} , получаемых после атмосферной коррекции измерений цветовых сканеров. Ниже мы опишем процедуру адаптации регионального алгоритма, созданного для СК *SeaWiFS* [1], на СК *MODIS* и *MERIS* с учетом новых данных о сезонной и пространственной изменчивости поглощения света фитопланктоном в Черном море [21, 30].

Актуальность этой работы связана с тем, что *SeaWiFS* закончил свою работу в декабре 2010 г., а два прибора *MODIS* продолжают свою работу на спутниках *Terra* и *Aqua* соответственно. Цветовой сканер *MERIS* также завершил свою работу в апреле 2012 г. Однако он интересен тем, что в совокупности с другими приборами позволяет получить более качественный объединенный (*merge*-) продукт за счет увеличения процента заполнения



Р и с . 2 . Изменчивость двух отношений величин R_{RS} в трех СК в глубоководной части Черного моря ($43.2 \pm 0.3^\circ$ с.ш. и $32.0 \pm 0.4^\circ$ в.д.) на примере 2003 г. для приборов *SeaWiFS* (а), *MODIS-Aqua* (б), *MERIS* (в) и *MODIS-Terra* (г) по данным с двухнедельным осреднением. Цифры обозначают номер месяца.

акватории Черного моря полезными данными.

Материалы. В этой работе были использованы спутниковые данные второго уровня (*level 2*) (т.е. результаты стандартной атмосферной коррекции для трех длин волн с набором масок и флагов) четырех цветовых сканеров *SeaWiFS*, *MODIS-Terra/Aqua* и *MERIS* [3] над Черным морем за весь период их работы (табл.1). Для каждого цветового сканера была обработана каждая сцена (т.е. измерения, выполненные на одном витке, захватывающем Черное море) по следующей схеме:

- проведена выбраковка с учетом флагов и масок (табл.1); физический смысл флагов и масок можно найти на <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/VALIDATION/flags.html>;

- данные в виде отношений $R_{RS}(\lambda)$ в двух СК для двух комбинаций $R_{RS}(\lambda_2)/R_{RS}(\lambda_1)$ и $R_{RS}(\lambda_3)/R_{RS}(\lambda_2)$ из табл.1 были усреднены на сетке $0,025^\circ$ по широте и $0,035^\circ$ по долготе.

Кроме того, для контроля качества настройки алгоритма были использованы результаты измерений *in situ* C_a и a_{CDM} в верхнем (не глубже 5 м) слое моря (табл.2), собранных и обработанных группой Т. Чуриловой по методикам, описанным, например, в [11, 24].

Таким образом, были использованы данные нескольких экспедиций ИнБЮМ НАН Украины, выполненных в разные сезоны и в разных районах Черного моря. К сожалению, отсутствуют измерения в весенний и зимний периоды.

Т а б л и ц а 1. Некоторые характеристики спутниковых данных *level 2*, использованных в настоящем исследовании.

спутниковый прибор (сканер цвета)/ формат	версия данных	центры спектральных каналов, нм			набор ^β флагов/масок	период работы (начало – конец)
		λ_1	λ_2	λ_3		
<i>SeaWiFS/GAC</i>	R2010.0	490	510	555	4, 6, 8 ^α , 9, 13	сент. 1997 – дек. 2010
<i>MODIS-Terra</i> ^γ	R2013.0	488	531	547	4, 6, 9, 24 ^α	февр. 2000 – работает
<i>MERIS/RR/FRS</i>	R2012.0	490	510	560	4, 6, 9, 24 ^α	май 2002 – апр. 2012
<i>MODIS-Aqua</i> ^γ	R2013.1	488	531	547	4, 6, 9, 24 ^α	июль 2002 – работает

Примечание: α – флаги формируются нами самостоятельно при обработке данных и указывают на знак восстановленного после атмосферной коррекции коэффициента яркости моря, как это было в предыдущей версии данных для флага 8; β – использованный набор флагов для выбраковки спутниковых данных *level 2*, γ – формат *LAC (Local Area Coverage)*, *GAC* – *Global Area Coverage*, *RR* – *Reduced Resolution*, *FRS* – *Full Resolution*.

Т а б л и ц а 2. Измерения *in situ* C_a и a_{CDM} .

название экспедиции	период проведения экспедиции	количество измерений <i>in situ</i> C_a / a_{CDM}
НИС Паршин	2005: сентябрь – октябрь	38/0
НИС Пр. Водяницкий 67	2010: октябрь	25/0
НИС Пр. Водяницкий 68	2010: ноябрь	29/0
НИС Пр. Водяницкий 69	2011: август	28/28
НИС Пр. Водяницкий 70	2011: август	25/24
НИС Пр. Водяницкий 73	2013: июнь	10/10

Методика. Исходное уравнение, описывающее функциональную связь между коэффициентом яркости моря и первичными гидрооптическими характеристиками морской воды, имеет следующий вид:

$$R_{RS}(\lambda) \cong \text{const}(b_b/a),$$

где a и b_b – коэффициенты поглощения и рассеяния света морской водой соответственно.

Полагая, что $b_b(\lambda_2)/b_b(\lambda_1) \approx (\lambda_2/\lambda_1)^{-n}$, и имея измерения в трех СК, можно записать систему из двух уравнений

$$\begin{aligned} \frac{R_{RS}(\lambda_2)}{R_{RS}(\lambda_1)} &= \frac{a(\lambda_1)}{a(\lambda_2)} \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{-n} \\ \frac{R_{RS}(\lambda_3)}{R_{RS}(\lambda_2)} &= \frac{a(\lambda_2)}{a(\lambda_3)} \cdot \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right)^{-n}. \end{aligned} \quad (2)$$

Обратим внимание, что обратное рассеяние света морской водой в уравнениях (2) присутствует только параметром его спектрального наклона

(n). А это значит, что, выбирая близкие СК, изменчивостью n можно пренебречь, и отношение коэффициентов яркости моря является функцией отношения суммарного поглощения света морской водой в этих СК.

Используя мало параметрическую модель оптических свойств морской воды [4] и функциональные связи ее отдельных компонент, решение системы уравнений (2) относительно коэффициента поглощения света фитопланктоном на длине волны $\lambda_0 = 490$ нм и суммарного коэффициента поглощения света окрашенной компонентой растворенного органического и неживого взвешенного вещества на этой же длине волны, можно записать в следующем виде

$$a_{ph}(\lambda_0) = \Psi_{ph}(\bar{a}_w, \bar{\gamma}, \bar{\chi}, \bar{k}, \bar{I}), \quad a_{CDM}(\lambda_0) = \Psi_{CDM}(\bar{a}_w, \bar{\gamma}, \bar{\chi}, \bar{k}, \bar{I}), \quad (3)$$

где обозначения $\bar{a}_w, \bar{\gamma}, \bar{\chi}, \bar{k}, \bar{I}$ описаны в табл.3.

Как показано в [1], знак второй производной k_i по длине волны определяет тип решения: положительный знак – *Deep* решение, отрицательный – *Shelf* решение. Систему из уравнений (3) можно легко переписать в виде, удобном для анализа спутниковых (или измерений *in situ*, если таковые имеются) данных в двумерном пространстве $\{I_1, I_2\}$, где уравнения (4) позволяют построить набор изолиний $a_{ph}(\lambda_0)$ и $a_{CDM}(\lambda_0)$.

$$I_1 = M_{ph}(\bar{a}_w, \bar{\gamma}, \bar{\chi}, \bar{k}, a_{ph}(\lambda_0), I_2), \quad I_1 = M_{CDM}(\bar{a}_w, \bar{\gamma}, \bar{\chi}, \bar{k}, a_{CDM}(\lambda_0), I_2). \quad (4)$$

Введем обозначения для двух двумерных пространств, связанных между собой системой уравнений (3). Первое, $\bar{L}$ соответствует пространству $\{I_2, I_1\}$, которое с точностью до отношения солнечных постоянных эквивалентно пространству отношений коэффициентов яркости $\{R_{RS}(\lambda_3):R_{RS}(\lambda_2), R_{RS}(\lambda_2):R_{RS}(\lambda_1)\}$ (см. табл.3). Второе, $\bar{P}$ соответствует пространству $\{a_{ph}(\lambda_0), a_{CDM}(\lambda_0)\}$.

Т а б л и ц а 3. Описание обозначений $\bar{a}_w, \bar{\gamma}, \bar{\chi}, \bar{k}, \bar{I}$, входящих в уравнения (3).

обозначения	вид выражения	источник
$\bar{I}$	$I_1 = \frac{F_2 \cdot R_{RS}(\lambda_2)}{F_1 \cdot R_{RS}(\lambda_1)} \equiv \frac{nLw(\lambda_2)}{nLw(\lambda_1)}$ и $I_2 = \frac{F_3 \cdot R_{RS}(\lambda_3)}{F_2 \cdot R_{RS}(\lambda_2)} \equiv \frac{nLw(\lambda_3)}{nLw(\lambda_2)}$	$F_i, i = 1, 2, 3$ солнечные постоянные в 3-х СК [22]
$\bar{a}_w$	$a_w(\lambda_i), i = 1, 2, 3$	коэффициенты поглощения света чистой морской водой [23]
$\bar{\gamma}$	$\exp(-S \cdot (\lambda_i - \lambda_0)), i = 1, 2, 3$	S – спектральный наклон a_{CDM} [4, 24, 25]
$\bar{\chi}$	$\chi_1 = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^n \quad u \quad \chi_2 = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)^n$	n – [1]
$\bar{k}$	$k_i = \frac{a_{ph}(\lambda_i)}{a_{ph}(\lambda_0)}, i = 1, 2, 3$	[1]

Примечание: $\lambda_0 = 490$ нм, $nLw(\lambda)$ – нормализованная яркость излучения, выходящая из-под поверхности воды.

Суть настройки регионального алгоритма восстановления C_a и a_{CDM} по спутниковым данным заключается в таком подборе констант модели (4) для каждого из приборов *SeaWiFS*, *MODIS-Aqua/Terra* и *MERIS*, чтобы:

- для фиксированного географического разреза и фиксированного дня (один и тот же день, одни и те же координаты разреза) образы в пространстве $\tilde{L}$ соответствовали одному и тому же образу из пространства $\tilde{P}$ или были близки к нему; причем последнее должно выполняться для разных сезонов (зима, весна, лето, осень) и разных районов моря (приустьевой район Дуная, северо-западный шельф, глубоководный район); то же самое должно быть справедливым для спутниковых данных с 2-х недельным осреднением;

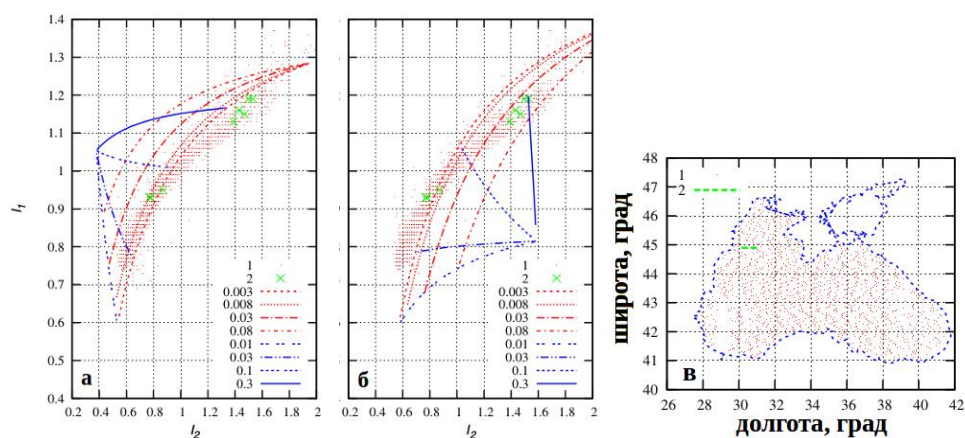
- весь набор в пространстве $\tilde{L}$, реализовавшийся на всей площади моря в один и тот же день или для спутниковых данных с 2-х недельным осреднением для любого сезона, находится внутри соответствующего образа в пространстве $\tilde{P}$, диапазон которого характерен для Черного моря, вне зависимости от прибора;

- косвенным критерием качества работы регионального алгоритма для каждого прибора в отдельности является сравнение значений C_a и a_{CDM} , рассчитанных по региональному алгоритму (3) с учетом [21, 30], с измерениями *in situ*, выполненных день-в-день со спутниковыми измерениями.

Техника и результаты настройки регионального алгоритма в $\tilde{L}-\tilde{P}$ пространстве на основе анализа конкретных реализаций представлены в следующем разделе.

Результаты. В этом разделе представлено распространение результатов работы [1] на СК приборов *MODIS* и *MERIS*, основанное на построении согласованного между собой поведения сигналов на специально выбранных разрезах ежедневных/двухнедельных карт в пространстве $\tilde{L}$ с учетом новых данных о C_a , рассчитанных по данным поглощения света пигментами фитопланктона [21, 30].

На рис.3 – 8 показаны окончательные результаты настройки регионального алгоритма для трех сканеров цвета: *SeaWiFS*, *MODIS-Aqua* и *MERIS*. Всего таких рисунков 24 (3 прибора $\times$ 4 сезона $\times$ 2 варианта осреднения по времени). Из-за ограничений на количество рисунков в статье приведены только некоторые из них. Не показаны результаты для сканера *MODIS-Terra*, который имеет тот же набор СК, что и сканер *MODIS-Aqua*. Поэтому набор модельных констант для *MODIS-Terra* и *MODIS-Aqua* один и тот же. Настройка алгоритма проводилась по методике, описанной выше. На каждом из рис.3 – 8 показано положение разреза (правый рисунок) на фоне географического положения всех измерений (точки на карте моря) для текущего дня или средней двухнедельной реализации (карты). Отображение этого разреза (крестики) показано на фоне изолиний a_{ph} и a_{CDM} для *Deep*-решения (левый рисунок) и *Shelf*-решения (средний рисунок). Кроме того, на этих трех рисунках точками показан образ всех реализовавшихся ситуаций на этот день. Коэффициенты регионального алгоритма для каждого прибора подбирались отдельно и были фиксированными для всех сезонов. Окончательный результат подборки коэффициентов для каждого прибора представлен в табл.4.



Р и с. 3. Пример отображения разреза (в, 2 – зеленый пунктир, координаты 44.9° с.ш. и 30.15° – 31.06° в.д.) и всех реализовавшихся ситуаций (в, 1 – красные точки) в пространстве $\{I_1, I_2\}$ на фоне изолиний $a_{ph}(490)$ (красные кривые, m^{-1}) и $a_{CDM}(490)$ (синие кривые, m^{-1}) для *Deep* решения (а, 2 – реализации на разрезе показаны зелеными крестиками, 1 – все реализации показаны красными точками) и *Shelf* решения (б, 2 – реализации на разрезе показаны зелеными крестиками, 1 – все реализации показаны красными точками) 9 июня 2003 г. (S2003160101108/GAC) для прибора *SeaWiFS*.

Т а б л и ц а 4. Параметры модели для трех сканеров цвета.

прибор параметры	<i>SeaWiFS</i>	<i>MODIS</i> <i>Aqua/Terra</i>	<i>MERIS</i>
n	1,45	1,45	1,45
$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$, нм	490\510\555	488\531\547	490\510\560
F , мкВт см ⁻² нм ⁻¹	197,38\187,40\183,61	194,178\185,944\186,998	197,38\187,40\181,58
a_w , м ⁻¹	0,015\0,0325\0,0596	0,0145\0,0439\0,0532	0,015\0,0325\0,0619
<i>Deep</i> решение			
S , нм ⁻¹	0,018	0,014	0,014
$\vec{k}$	1,0\0,85\1,95	1,02\1,15\1,8	1,0\0,85\2,1
<i>Shelf</i> решение			
S , нм ⁻¹	0,023	0,019	0,019
$\vec{k}$	1,0\1,1\0,6	1,02\0,70\0,53	1,0\1,1\0,62

Примечание: n не зависит от типа решения; S и $\vec{k}$ от типа решения.

Расчет величин C_a выполнялся согласно выражению $a_{ph}(490) = A \cdot C_a$, где коэффициент A является функцией типа решения

$$Deep: A = \frac{A_B}{2} \cdot \left[x_{\max} + x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{6} \cdot (month + 6.2)\right] \right] \quad (5)$$

$$Shelf: A = A_B \cdot x_{\min}.$$

Процедура определения типа решения описана в [1]. Значения констант A_B , $x_{\min}$ и $x_{\max}$ для каждого прибора приведены в табл.5. Физические причины, обуславливающие два типа решений в Черном море, по-видимому,

связаны со скачком в поле a_{CDM} и спецификой отношения $a_{ph}(\lambda_i):a_{ph}(\lambda_j)$ в диапазоне длин волн 480 – 560 нм на границе между глубоководной и шельфовой частями моря.

На рис.3 – 5 видно, что вдоль разреза из глубоководной части к устью Дуная в

летний период в пространстве $\tilde{L}$ происходит смена типа решения от *Deep* к *Shelf* с одновременным ростом величин как $a_{ph}(\lambda)$, так и a_{CDM} .

Отметим также, что наблюдаемая в Черном море изменчивость I_2 (ось абсцисс) существенно больше для *SeaWiFS* (рис.3 и 6) и *MERIS* (рис.5 и 8) по сравнению с *MODIS* (рис.4 и 7) при почти одинаковой изменчивости I_1 (ось ординат). Отсюда следует, что для решения задачи разделения a_{ph} и

Таблица 5. Численные значения параметров для расчета коэффициента A : по формуле (5).

прибор коэфф-ты	<i>SeaWiFS</i>	<i>MODIS</i>	<i>MERIS</i>
A_B	0,0274	0,0274	0,0274
x_{max}	1,5	2,5	1,3
x_{min}	0,45	0,25	0,35

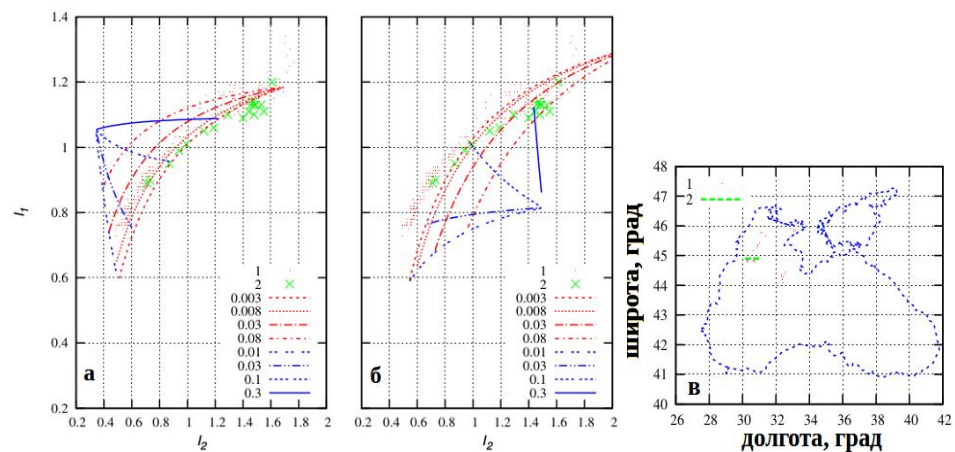


Рис. 4. Как на рис.3 9 июня 2003 г. (A2003160104000/LAC) для прибора *MODIS-Aqua*.

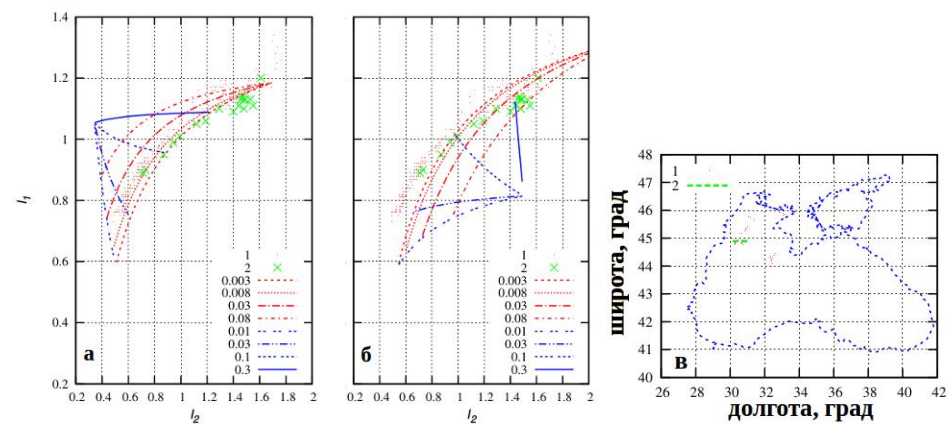
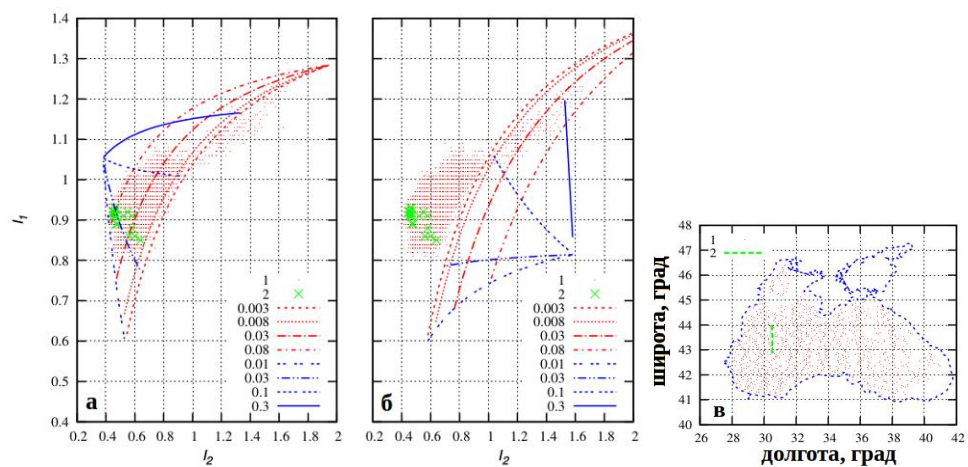
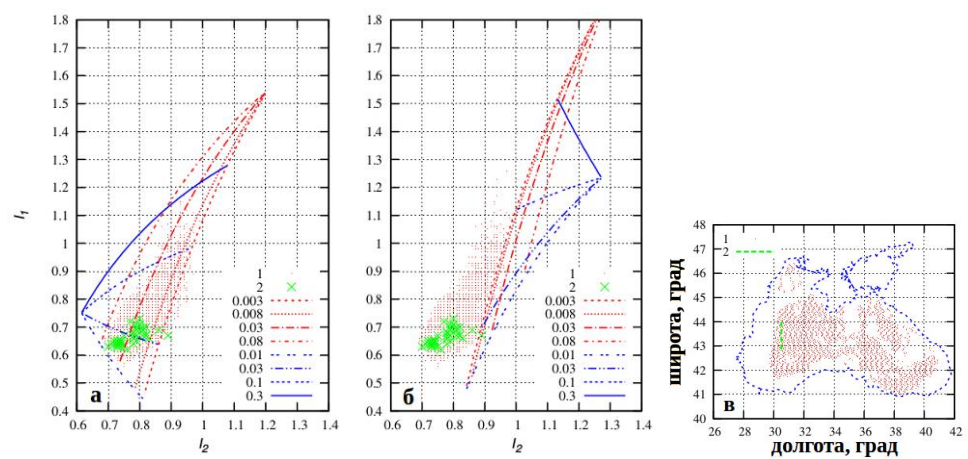


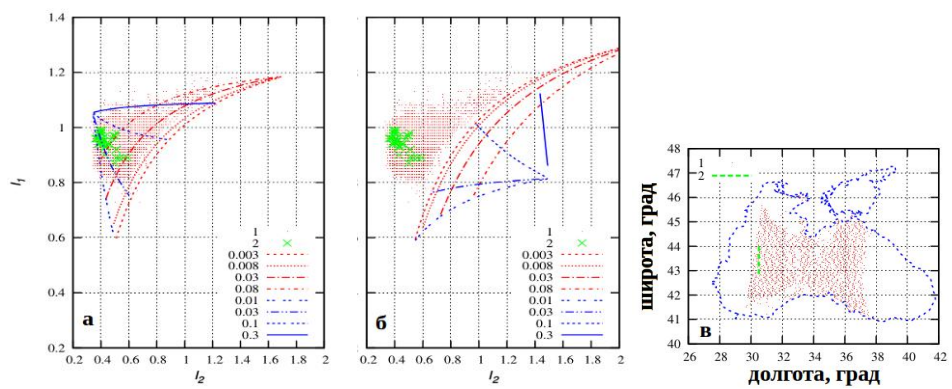
Рис. 5. Как на рис.3 9 июня 2003 г. (M2003160083431/RR) для прибора *MERIS*.



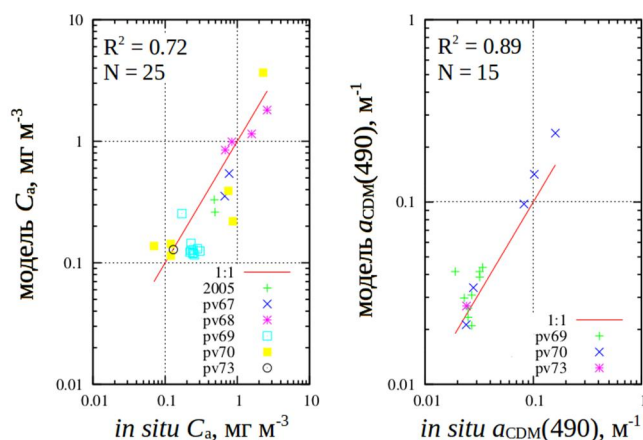
Р и с . 6. Как на рис.3 27 апреля 2003 г. (S2003117102541/GAC) для прибора SeaWiFS.



Р и с . 7. Как на рис.3 27 апреля 2003 г. (A2003117105500/LAC) для прибора MODIS-Aqua.



Р и с . 8. Как на рис.3 27 апреля 2003 г. (M2003117080238/FRS) для прибора MERIS.



Р и с . 9 . Результаты сравнения день-в-день измерений *in situ* C_a и a_{CDM} с модельными расчетами по региональному алгоритму (3) с учетом (5) по данным цветового сканера *MODIS-Aqua*.

a_{CDM} в Черном море набор СК *SeaWiFS* и *MERIS* является более оптимальным, чем набор СК *MODIS*.

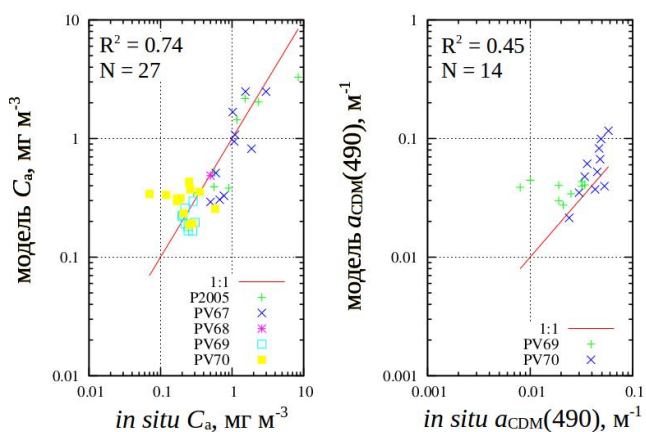
На рис.9 – 10 показаны результаты сравнения измерений *in situ* C_a и a_{CDM} (табл.2) с расчетами по региональному алгоритму (3) с коэффициентами из табл.4 – 5 на основе спутниковых данных *MODIS-Aqua* и *MERIS* для измерений день-в-день. В целом соответствие представляется удовлетворительным.

Отметим, что здесь не были приведены графики для *SeaWiFS* и *MODIS-Terra*, первый из которых в течение 2010 – 2011 гг. либо не работал (2011 г.), либо работал с перебоями (2010 г.). Следует отметить, что спектральный состав каналов *SeaWiFS* близок к спектральному составу каналов *MERIS*, поэтому они должны дать близкие результаты. Второй (*MODIS-Terra*) по набору спектральных каналов идентичен *MODIS-Aqua*.

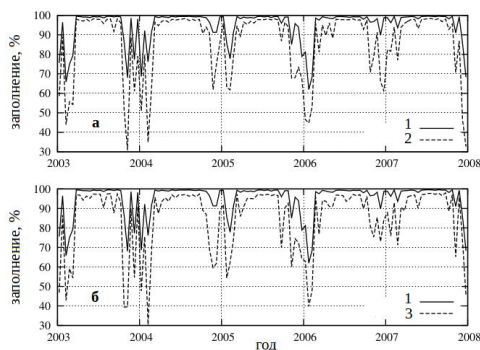
На рис.11 – 12 показан процент заполнения узлов сетки ($0,035^\circ$ по долготе и $0,025^\circ$ по широте) акватории Черного моря за две недели (с учетом выбраковок по флагам/маскам) для каждого прибора отдельно и для объединенного массива (т.е. *merge*-продукта). Для анализа специально выбран временной интервал 2003 – 2007 гг., когда все четыре прибора (*SeaWiFS*, *MODIS-Aqua/Terra* и *MERIS*) работали в нормальном режиме.

Анализ данных, представленных на рис.11 – 12, показывает:

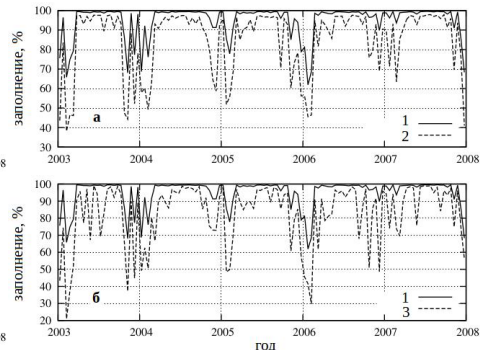
– для лета, в условиях малой облачности, процент покрытия отдельным прибором составляет более 90 %, дополнительная информация от других



Р и с . 10 . Как на рис.9 по данным цветового сканера *MERIS*.



Р и с . 1 1 . Процент заполнения узлов сетки ($0,035^\circ$ по долготе и $0,025^\circ$ по широте) всей акватории Черного моря за две недели *merge*-продуктом (1) и продуктом при условии работы одного прибора: (а, 2) *SeaWiFS* и (б, 3) *MODIS-Aqua*.



Р и с . 1 2 . Процент заполнения узлов сетки ($0,035^\circ$ по долготе и $0,025^\circ$ по широте) всей акватории Черного моря за две недели *merge*-продуктом (1) и продуктом при условии работы одного прибора: (а, 2) *MODIS-Terra* и (б, 3) *MERIS*.

приборов позволяет поднять нижнюю границу до 98 % и выше;

- для зимних месяцев, когда вероятность облачности возрастает, для одного прибора нижняя граница процента охвата узлов сетки лежит в интервале от 20 до 50 %, тогда как *merge*-продукт поднимает минимальное значение выше 60 %.

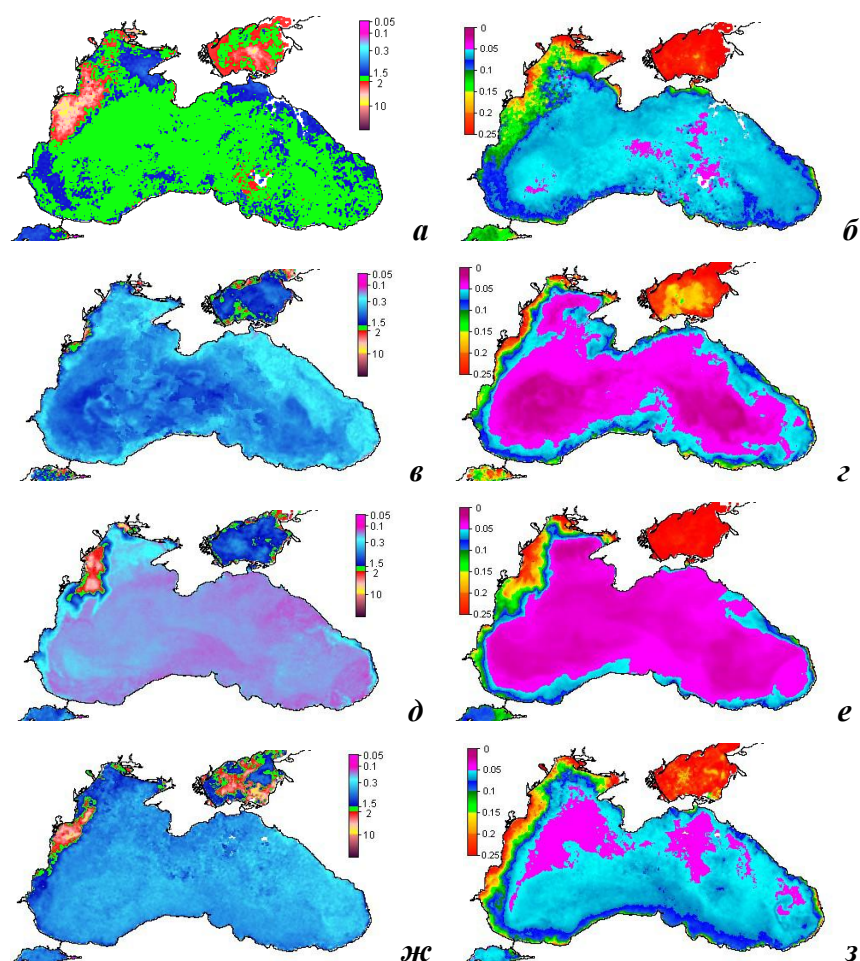
Причины этого могут быть связаны:

- с изменением конфигурации облаков из-за сдвига по времени пролета спутника над Черным морем;
- с изменением геометрии в системе «прибор-объект наблюдения-солнце», выбраковка по флагам/маскам (например, блик). В этом случае работает сдвиг по времени и особенности измерений разными приборами.

Таким образом, объединение результатов работы нескольких сканеров в рамках единого *merge*-продукта, более эффективно, по сравнению с использованием данных отдельных сканеров. Полученные результаты планируется использовать для расчета светового поля в верхнем слое Черного моря и первичной продукции по спектральной модели [25].

На основе синтеза результатов, получаемых по данным 4-х приборов: *SeaWiFS*, *MERIS* и *MODIS-Aqua/Terra* были получены первые версии *merge*-продуктов. На рис.13 приведены примеры двух недельных карт *merge*-продуктов C_a и a_{CDM} для 4-х сезонов. Карты, соответствующие апрелю 2003 г., наглядно свидетельствуют, что в период весеннего «цветения» фитопланктона относительно высокие значения C_a наблюдаются в глубоководной части моря и уменьшаются в направлении шельфа. В то же время величина a_{CDM} ведет себя противоположным образом – возрастает по направлению к шельфу, что возможно связано с дополнительным поступлением a_{CDM} с береговыми стоками. Изменчивость C_a и a_{CDM} в западной части Черного моря в основном определяется стоком Дуная и динамикой вод в этом районе.

На рис.14 представлена временная динамика средних значений C_a и a_{CDM} для глубоководной части (> 250 м) Черного моря и его шельфа (< 250 м).



Р и с . 13. Примеры *merge*-продуктов C_a , $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (а, в, д, ж) и $a_{\text{CDM}}(490)$, м^{-1} (б, г, е, з) для 4-х сезонов: первая половина января 2007 г. (а, б), вторая половина апреля 2003 г. (в, г), первая половина июня 2003 г. (д, е) и вторая половина октября 2002 г. (ж, з).

Минимальные значения a_{CDM} в глубоководной части моря наблюдаются в период весеннего «цветения». Летом значения a_{CDM} в глубоководной части моря меньше, чем в зимний и осенний период времени. Причем эти особенности проявляются, как на ежедневных данных, так и на данных с двухнедельным осреднением. В среднем сезонная динамика C_a в глубоководной части моря характеризуется «U»-образной кривой, с минимальными значениями летом, высокими значениями в холодный период года, на фоне которых в отдельные годы появляется кратковременный пик, соответствующий весеннему «цветению» фитопланктона. Отмеченные особенности хорошо согласуются с данными наблюдений *in situ* [11, 26]. В шельфовой зоне сезонная динамика C_a имеет более сложный характер, где также наблюдается высокая межгодовая изменчивость среднемесячных значений рассматриваемого показателя.

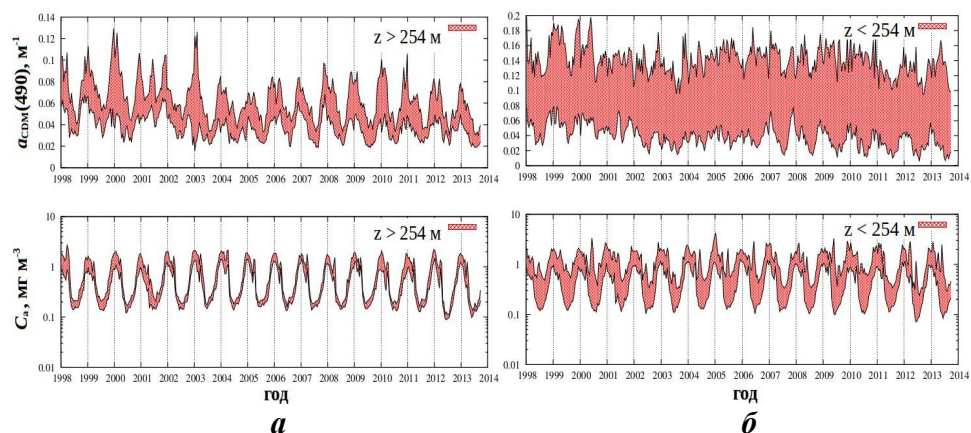


Рис. 14. Сезонная изменчивость *merge*-продуктов C_a , мг м^{-3} (снизу) и $a_{\text{CDM}}(490)$, м^{-1} (вверху) в глубоководной части (а) и на шельфе (б) Черного моря за весь период наблюдений цветовыми сканерами *SeaWiFS*, *MODIS-Aqua/Terra* и *MERIS*.

В целом полученный продукт соответствует современным представлениям о характере сезонной изменчивости рассматриваемых показателей и их числовой оценке [11, 26 – 28].

Предлагаемая модификация регионального алгоритма для новых сканеров, однако, сохранила ряд недостатков, присущих первой версии алгоритма [1]. В частности, необходимо уйти от фиксированных значений S и n , следствием которых является наличие *Dead* и *Cross* областей в пространстве $\bar{L}$ (см. [1]), как это было сделано в [29]. То же относится и к параметру модели $\bar{k}$ (табл.3), который в текущей версии является константой, зависящей от типа решения. Требуется уточнения и функциональная связь x_{max} и x_{min} (табл. 5) с удельными коэффициентами поглощения света пигментами фитопланктона, которые существенно меняются на протяжении годового цикла [24, 30]. Остается нерешенной проблема несовпадения констант, соответствующих физической теории, и констант, полученных для регионального алгоритма (табл.4, 5).

Выводы:

- на основе ранее разработанного подхода [1] проведено согласование регионального алгоритма восстановления C_a и a_{CDM} для СК *SeaWiFS*, *MODIS-Aqua/Terra* и *MERIS*;
- выполнено сравнение продуктов, восстановленных с помощью регионального алгоритма по спутниковым данным, с измерениями *in situ*, которые показали удовлетворительное соответствие между собой;
- создан *merge*-продукт C_a и a_{CDM} для Черного моря в виде двухнедельных карт, который охватывает период времени с сентября 1997 г. по настоящее время.

Современные геостационарные спутники успешно решают задачу заполнения акватории полезными данными в условиях переменной облачности [31], однако только для ограниченного географического района. Следующая генерация многоспектральных сканеров позволит искусственно из более узких СК формировать различные наборы СК, которые будут учитывать

региональные особенности (например, состав пигментов фитопланктона и его сезонную динамику), что позволит более точно оценивать величины C_a и a_{CDM} в отдельных районах Мирового океана, включая районы Арктики [32].

Благодарности. Авторы благодарят группу NASA/GSFC/OBPG за обработку и предоставление спутниковых данных. Работа осуществлялась при частичной поддержке РФФИ (гранты 14-45-01516 р_юг_а, 14-45-01595 р_юг_а и 14-45-01594 р_юг_а), гранта Президента РФ № МК-6085.2014.5 "Особенности формирования цвета морской поверхности в Дальневосточных морях и Восточной Арктике" и международных проектов *MyOcean2*, *DEVOTES* и *PERSEUS* 7-ой рамочной программы Европейского союза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Шулейкин В.В. Физика моря. гл.5. О физических корнях климата и погоды.– Л.: Изд-во АН СССР, 1941.– С.347-457.
3. Feldman G.C., McClain C.R. Ocean Color Web, SeaWiFS Reprocessing 2010.0, MODIS-Terra Reprocessing 2013.0, MODIS-Aqua Reprocessing 2013.1, MERIS Reprocessing 2012.0.– NASA Goddard Space Flight Center. Eds. Kuring, N., Bailey, S. W. Access October 2013. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
4. Копелевич О.В. Мало-параметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана, т.1. Физическая оптика океана / ред. А.С.Монин.– М.: Наука, 1983.– С.208-234.
5. IOCCG. Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications / Ed. Lee Z.-P. / Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, 2006.– № 5.– IOCCG, Dartmouth, Canada.
6. O'Reilly J.E., et al. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol.11 / Eds. S.B.Hooker, E.R.Firestone.– NASA Goddard Space Flight Center, 2000.– 49 p.
7. Lee Z.P., Carder K.L., Arnone R. Deriving inherent optical properties from water color: A multi-band quasi-analytical algorithm for optically deep waters // Appl. Opt. – 2002.– 41, № 27.– P.5755-5772.
8. Maritorena S., Siegel D.A., Peterson A.R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications // Appl. Opt.– 2002.– 41, № 15.– P.2705-2714.
9. 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.
10. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V. et al. Application of SeaWiFS data for studying variability of biooptical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // DeepSea Res.– 2004.– II 51.– P.1063-1091.
11. Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П., Георгиева Л.В. Изменчивость био-оптических характеристик фитопланктона в Черном море // Океанология.– 2004.– т.44, № 2.– С.208-221.
12. Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V. et al. Bio-optical characteristics of the Aegean Sea retrieved from satellite ocean color data / Eds Malanotte-Rizzoli P., Eremeev V.N. / The Eastern Mediterranean as a Laboratory Basin for the Assessment of Contrasting Ecosystems.– Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999.– P.313-326.

13. Суетин В.С., Королев С.Н., Суслин В.В. и др. Проявление особенностей оптических свойств атмосферного аэрозоля над Черным морем при интерпретации данных спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофизический журнал.– 2004.– № 1.– С.69-79.
14. Суетин В.С., Королев С.Н., Суслин В.В. и др. Уточненная интерпретация данных наблюдений Черного моря спутниковым прибором SeaWiFS осенью 1998 г. // Морской гидрофизический журнал.– 2008.– № 2.– С.68-79.
15. Claustre H., Morel A., Hooker S.B., et al. Is desert dust making oligotrophic waters greener? // Geophys. Res. Lett.– 2002.– 1469.– 29, № 10.– doi:10.1029/2001GL014056.
16. Zibordi G., Mélin F., Berthon J., Holben B., Slutsker I., et al. AERONET-OC: A Network for the Validation of Ocean Color Primary Products // J. Atmos. Oceanic Technol.– 2009. 26.– P.1634-1651. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2009JTECHO654.1>
17. Gohin F., Druon J.N., Lampert L. A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters // Intern. J. Remote Sensing.– 2002.– 23.– P.1639-1661.
18. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Vazyulya S.V., Sahling I.V. Bio-optical characteristics of the Russian seas from satellite ocean color data of 1998-2012 // Proc. VII Intern. Conf. «Current problems in optics of natural waters» (ONW'2013), St-Petersburg, September 10-14, 2013.– Saint-Petersburg, Publishing house of «Nauka» of RAS, 2013.– P.168-171.
19. Нейтмин Г.Г., Земляная Л.А., Мартынов О.В. и др. Оценка концентрации хлорофилла по измерениям индекса цвета в различных районах Мирового океана // Океанология.– 1982.– 22, № 3– С.380-385.
20. Aiken J., Moore G.F., Trees C.C., Hooker S.B., Clark D.K. SeaWiFS Technical Report Series / Series Eds S.B.Hooker, E.R.Firestone, Techn. Ed. J.G.Acker / The SeaWiFS CZCS-Type Pigment Algorithm Laboratory for Hydrospheric Processes Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland 20771, TM-104566.– June 1995.– v.29.– 34 p.
21. Dzulay A.A., Churilova T.Ya., Mukhanov V.S., Manjos L.A., Gubanov V.I. Seasonal variability of the phytoplankton light absorption in shelf waters near the Crimea: influence of the intracellular pigment concentration and a size-species structure of phytoplankton // Proc. VII Intern. Conf. «Current problems in optics of natural waters» (ONW'2013), St-Petersburg, September 10-14, 2013.– Saint-Petersburg: Publishing house of «Nauka» of RAS, 2013.– P.118.
22. 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.– 214(1).– P.1-22.
23. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380-700 nm) of the pure water. II. Integrating cavity measurements // Appl. Opt.– 1997.– v.36.– P.8710-8723.
24. 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 // Proc. 4th Intern. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters», Nizhny Novgorod, September 11-15, 2007.– Nizhny Novgorod, 2007.– P.70-74.
25. Churilova T., Suslin V., Sosik H. Bio-optical spectral modelling of underwater irradiance and primary production in the Black Sea // Proc. XIX Ocean Optics conference, Tuscany, Italy, 6-10 October 2008.– CD.
26. Демидов А.Б. Сезонная изменчивость и оценка годовых величин первичной продукции фитопланктона в Черном море // Океанология.– 2008.– т.48, № 5.– С.718-733.

27. Ведерников В.И., Демидов А.Б. Долговременная и сезонная изменчивость хлорофилла и первичной продукции в восточных районах Чёрного моря / Комплексные исследования северо-восточной части Чёрного моря. Ред. А.Г.Зацепин, М.В.Флинт.– М.: Наука, 2002.– С.212-234.
28. Кропотов С.И., Кривенко О.В. Хлорофилл "а" и продукты его распада в водах Черного моря: сезонная и межгодовая изменчивость // Журнал общей биологии.– 1999.– т.60, № 5.– С.556-570.
29. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Пряхина С.Ф. Региональная методика восстановления первичных гидрооптических характеристик Черного моря по данным цветового сканера SeaWiFS // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– вып.26, т.2.– С.204-223.
30. Чурилова Т.Я., Джулай А.А., Суслин В.В., Кривенко О.В., Ефимова Т.В., Манжос Л.А., Муханов В.С., Целинский В.С. Содержание пигментов и биооптические показатели вод западной части Черного моря в осенний и летний периоды // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014.– настоящий выпуск
31. <http://kosc.kordi.re.kr/oceansatellite/coms-goci/specification.kosc>
32. Салюк П.А., Стёпочкин И.Е., Голик И.А., Букин О.А., Павлов А.Н., Алексанин А.И. Разработка эмпирических алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла *a* и окрашенных растворенных органических веществ для дальневосточных морей из дистанционных данных по цвету морской поверхности // Исследование Земли из космоса.– 2013.– № 3.– С.45-57.

Материал поступил в редакцию 20.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ Представлена модифікація регіонального алгоритму [1] для спектральних каналів кольорних сканерів MODIS і MERIS. Порівняння результатів модельних розрахунків концентрації хлорофілу «а» і коефіцієнта поглинання світла неживим органічною речовиною на довжині хвилі 490 нм з вимірами *in situ* показало задовільний відповідність. Побудовані двотижневі карти цих продуктів, починаючи з вересня 1997 по теперішній час, в яких використані дані сканерів SeaWiFS, MODIS і MERIS.

ABSTRACT The SeaWiFS version of the Black Sea regional algorithm [1] has been modified for MODIS and MERIS bands. Two-weekly maps of chlorophyll *a* concentration (C_a) and light absorption by colored detrital matter (a_{CDM}) merge-products have been produced from September 1997 up to now. The comparison of model products with *in situ* measured data demonstrate that the new version of regional algorithm provides adequate assessment of C_a and $a_{CDM}(490)$.