

УДК 581.132.1:551.46.08:519.876.5(262.5)

© В. В. Суслин¹, Т. Я. Чурилова², М. Е. Ли¹, С. Мончева³, З. З. Финенко²

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

²Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

³Институт океанологии БАН, Варна, Болгария

slava.suslin@mhi-ras.ru

КОНЦЕНТРАЦИЯ ХЛОРОФИЛЛА-А В ЧЕРНОМ МОРЕ: СРАВНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ АЛГОРИТМОВ

Статья поступила в редакцию 31.10.2017, после доработки 19.01.2018.

Для Черного моря проведено сравнение трех алгоритмов, стандартного *NASA*, Института океанологии им. П. П. Шишова РАН и Морского гидрофизического института РАН, восстановления концентрации хлорофилла-*a* (C_a) по данным спутниковых измерений в видимом диапазоне спектра на основе доступных измерений *in situ* за период с 1997 по 2015 гг. Результаты сравнения для трех спутниковых сканеров *SeaWiFS*, *MODIS-Aqua* и *MODIS-Terra* показали: 1) стандартный продукт *NASA* завышает C_a во всем его диапазоне изменчивости в Черном море, причём величина относительной ошибки составляет около 300 %; 2) продукт Института океанологии им. П. П. Шишова РАН аппроксимируется в логарифмических осях $\{C_a(in situ), C_a(алгоритм)\}$ прямой, которая имеет такой же наклон, как и аналогичная аппроксимация стандартного продукта *NASA*, но, благодаря сдвигу в диапазоне C_a от 0.2 до 0.9 мг·м⁻³, лучше соответствует наблюдениям в терминах относительной ошибки (~80 %); 3) продукт Морского гидрофизического института дает наименьшую относительную ошибку (~40 %), но обладает высокой чувствительностью к качеству спектрального коэффициента моря (R_{RS}), т. е. к отношению R_{RS} в двух спектральных каналах из диапазона 480—560 нм.

Ключевые слова: концентрация хлорофилла-*a*, Черное море, дистанционное зондирование, видимый диапазон, региональный биооптический алгоритм.

V. V. Suslin¹, T. Ya. Churilova², M. Lee¹, S. Moncheva³, Z. Z. Finenko²

¹Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia

²Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russia

³Institute Oceanology BAS, Varna, Bulgaria

COMPARISON OF THE BLACK SEA CHLOROPHYLL-A ALGORITHMS FOR SEAWIFS AND MODIS INSTRUMENTS

Received 31.10.2017, in final form 19.01.2018.

We compared the global and two regional chlorophyll-*a* algorithms for *SeaWiFS* and *MODIS-Aqua/Terra* instruments in the Black Sea based on *in situ* measurements of the chlorophyll-*a* concentration (below C_a) in the upper sea layer during 1997—2015. Comparison results for three *SeaWiFS*, *MODIS-Aqua* and *MODIS-Terra* instruments showed: 1) the standard product *NASA* overestimates C_a throughout the range of variability of C_a in the Black Sea, the average value of the relative error is about 300 %; 2) the product of the Shirshov's Institute of Oceanology has the same slope in the logarithm axes $\{C_a(in situ), C_a(algorithm)\}$, like the standard *NASA* product, but due to the shift, in the C_a range from 0.2 to 0.9 mg·m⁻³ is better, in terms of relative error (~80 %) corresponds to observations; 3) the product of the Marine Hydrophysical institute gives the smallest relative error (~40 %), but it has a high sensitivity to the quality of the remote spectral reflectance (R_{RS}), that is, to the ratio of R_{RS} in two bands from 480—560 nm.

Key words: chlorophyll-*a* concentration, Black Sea, remote sensing, visible domain, regional biooptical algorithm.

Ссылка для цитирования: Суслин В. В., Чурилова Т. Я., Ли М. Е., Мончева С., Финенко З. З. Концентрация хлорофилла-*a* в Черном море: Сравнение спутниковых алгоритмов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3, 64—72.

For citation: Suslin V. V., Churilova T. Ya., Lee M., Moncheva S., Finenko Z. Z. Comparison of the Black Sea chlorophyll-*a* algorithms for *SeaWiFS* and *MODIS* instruments. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 3, 64—72.

doi: 10.7868/S2073667318030085

При моделировании морских экосистем, в частности Черного моря [1], одним из ключевых входных параметров является концентрация хлорофилла-а (C_a). Современные возможности дистанционного зондирования в видимом диапазоне спектра позволяют получать C_a в верхнем слое моря в оперативном режиме. Последнее дает возможность как для контроля текущего состояния экосистемы, так и ее прогноза [2]. Очевидно, чтобы получать удовлетворительные результаты диагноза и прогноза состояния морской среды, нужно иметь не только хорошие модели, но максимально точные входные данные, которые используются при ассимиляции этими моделями.

В настоящее время для Черного моря активно используются три алгоритма восстановления C_a : стандартный глобальный алгоритм *NASA* [3], далее алгоритм *NASA*, региональный алгоритм Института океанологии им. П. П. Ширшова [4], далее алгоритм *SIO*, и региональный алгоритм Морского гидрофизического института [5], далее алгоритм *MHI*.

Рассмотрим общие и отличительные черты этих трёх алгоритмов. Общее между *NASA* и *SIO* алгоритмами состоит в том, что используется одно отношение коэффициентов яркости моря (R_{RS}) в двух спектральных каналах λ_1 и λ_2 для нахождения C_a

$$C_a = \sum_{i=1, \dots, 5} A_i \left(R_{RS}(\lambda_1) / R_{RS}(\lambda_2) \right)^{B_i}, \quad (1)$$

где A и B — константы, зависящие от спектрального канала λ . Различие между глобальным *NASA* и региональным *SIO* алгоритмами заключается в том, что региональный алгоритм учитывает повышенное содержание растворённого органического вещества *CDOM* в Чёрном море. Это достигается за счёт специально подобранных спектральных каналов и коэффициентов A и B в регрессионном уравнении (1). В первом приближении изменчивость отношения R_{RS} в двух специально выбранных спектральных каналах пропорционально изменчивости поглощению морской воды в одном из этих спектральных каналов

$$R_{RS}(\lambda_2) : R_{RS}(\lambda_1) \sim a(\lambda_1) : a(\lambda_2) \sim a(\lambda_1), \text{ т. к. } \Delta a(\lambda_1) / a(\lambda_2) \gg \Delta a(\lambda_2) / a(\lambda_1),$$

где $a(\lambda)$ — спектральный показатель поглощения морской воды. Очевидно, что уравнение (1) применимо только в том случае, когда есть однозначная связь между показателем поглощения неживым органическим веществом a_{CDM} и C_a (или показателем поглощения фитопланктона a_{ph}) для конкретного района моря и/или сезона, как например, глубоководной части моря в летний [6] или осенний период [7]. Однако примеры весны 1998 г. и лета 2001 г. для глубоководной части моря показывают, что такая связь становится неудовлетворительной [8]. Отличительная черта *MHI* алгоритма состоит в том, что он использует два отношения R_{RS} в трех спектральных каналах из диапазона длин волн 480—560 нм [5, 8]. Последние дают возможность, имея два уравнения, найти два неизвестных a_{CDM} и a_{ph} , определяющих изменчивость $a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{CDM}(\lambda) + a_{ph}(\lambda)$, если нам известен спектральный закон изменчивости a_{CDM} и a_{ph} . Спектр показателя поглощения чистой морской водой a_w считается известным [9].

Если алгоритм *NASA* имеет одну «ветку» решения [https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/], то *SIO* и *MHI* алгоритмы имеют две «ветки» решения. *SIO* алгоритм — это западная и восточная «ветки», для которых функциональная связь одна и та же (1), а различия заключаются в коэффициентах A и B отдельно для западной и восточной частей Чёрного моря. Алгоритм *MHI* также имеет две «ветки», которые имеют разные знаки второй производной k''_λ по длине волны: для *Deep* решения — $k''_\lambda > 0$, для *Shelf* решения — $k''_\lambda < 0$, где

$$k(\lambda_i) = a_{ph}(\lambda_i) / a_{ph}(490), i = 1, 2, 3, \\ \text{а } \lambda_i \text{ для } SeaWiFS \text{ равны } 490, 510 \text{ и } 555 \text{ нм и для } MODIS — 488, 531 \text{ и } 547 \text{ нм.}$$

Со времени создания этих алгоритмов прошло достаточно много времени, в течение которого накопились новые измерения *in situ* о C_a в верхнем слое Черного моря. Эти данные собраны традиционным путём в научных экспедициях, из общедоступных баз данных [10], публикаций [11] или в результате прямых контактов авторов внутри научного сообщества. Поэтому становится актуальным, с одной стороны, использовать все доступные данные, с другой стороны, использовать один и тот же массив измерений *in situ* для проверки упомянутых выше трёх алгоритмов восстановления C_a по данным спутниковых измерений в видимом диапазоне спектра для разных оптических сканеров.

Методы и материалы

Измерения *in situ*. Мы использовали все доступные нам измерения *in situ* о C_a в верхнем слое моря 0—5 м за период с 1997 по 2015 гг. В тех случаях, когда нам была известна только сумма C_a с феофитином,

для перехода к C_a использовали делитель 1.3. Это среднее значение, полученное по данным измерений Чуриловой и Финенко в Черном море, где нам одновременно были известны сумма C_a и феофетина- a и отдельно C_a . Список источников измерений *in situ* представлен в первой колонке таблиц 1 и 2 для прибором *SeaWiFS* и *MODIS-Aqua* соответственно. Для *MODIS-Terra* список источников измерений *in situ* практически совпадает со списком для *MODIS-Aqua* (табл. 2). Измерения *in situ* были выполнены по методикам, которые описаны в работе [12].

Спутниковые данные. В анализе использованы спутниковые данные *SeaWiFS*\R2014.0\MLAC\Level-2 [13], *MODIS-Aqua*\R2014.0\LAC\Level-2 [14] и *MODIS-Terra*\R2014.0\LAC\Level-2 [15], где RYYYY.X означает версию обновления данных, YYYYY — год обновления данных, X — порядковый номер обновления в YYYYY году, начиная с 0; LAC (Local Area Coverage) — пространственное разрешение данных (в нашем случае составляет ~ 1 км в надир); MLAC (Merge Local Area Coverage) — объединение снимков LAC, сделанных разными наземными станциями приема спутниковой информации в реальном режиме времени на одном витке. Level-2 продукт обозначает данные второго уровня, которые включают время измерения, географическую привязку и ряд стандартных продуктов в физических единицах:

— спектр коэффициента яркости моря, R_{rs} в sr^{-1} [16];

— концентрация хлорофилла- a , C_a в $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, рассчитанная на основе стандартного алгоритма NASA (для *SeaWiFS* — OC4; для *MODIS* - OC3M) [17];

и некоторые другие, которые в данной работе не рассматриваются.

Кроме того, каждому элементу спектрального изображения (далее пиксел) соответствует 32-х битовое число, содержащее набор флагов и масок, характеризующих качество информации [18] и используемых далее нами для формирования совместных выборок спутниковых продуктов и измерений *in situ*.

Метод. Для подготовки совместной выборки измерений *in situ* и результатов расчетов C_a по спутниковым данным применялись следующие критерии. Спутниковые и полевые измерения должны быть выполнены в один и тот же календарный день. Для анализа использовались две выборки из спутникового продукта Level-2: 1) с набором флагов, далее эта выборка называется *Green*, 2) и ее дополнение, далее эта выборка называется *Red*, что эквивалентно тому, что достаточно одному из перечисленных флагов иметь значение 1, как весь набор стандартных продуктов Level 2, включая спектр R_{rs} и C_a , попадает в *Red* выборку. Набор флагов для *Green* и *Red* выборок приведен в примечаниях к табл. 1. По сути *Green* выборка — это выборка, в которой спутниковые измерения не подвержены влиянию неблагоприятных факторов, являющихся источником ошибок при выполнении стандартной процедуры атмосферной коррекции, т. е. восстановления спектра R_{rs} [16]. Для *Green* выборки одновременно должны выполняться следующие условия для флагов:

— отсутствие блика (флаг 4: $f04 = 0$);

— зенитный угол наблюдения поверхности Земли со спутника не должен превышать 60° (флаг 6: $f06 = 0$);

— отсутствие облачности (флаг 10: $f10 = 0$);

— зенитный угол Солнца для наблюдаемого участка земли должен быть меньше 70° (флаг 13: $f13 = 0$);

— максимальное число итераций для поиска соответствующей атмосферной модели аэрозоля не должно превышать 10 (флаг 20: $f20 = 0$);

— дополнительно для прибора *MODIS* учитывался флаг 30 ($f30 = 0$), указывающий на отсутствие повышенной поляризации в регистрируемом излучении.

Мы рассматривали окрестность из спутниковых данных вокруг измерения *in situ* по долготе $\pm 0.035^\circ$ и по широте $\pm 0.025^\circ$. Выбор размера района вокруг измерения *in situ* обусловлен тем, что у нас либо отсутствовала информация о времени измерения (часах и минутах), либо оно не совпадало с временем спутникового измерения. Поэтому водная масса могла удалиться от точки измерения на расстояние от 2 до 4-х км при характерных скоростях поверхностных течений $5\text{—}10\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, учитывая разность во времени до 10 ч. Максимальное количество спутниковых измерений, которое попадало в такую окрестность, не превышало восьми (в среднем около четырех). Для каждого из трёх алгоритмов выбиралось лучшее по C_a решение

Таблица 1

**Количество безоблачных ситуаций для сканера *SeaWiFS*,
совпадающих с измерениями *in situ* для двух выборок: *Green* и *Red***

**Number of cloudless cases for the *SeaWiFS* instrument,
which coincide with *in situ* measurements for *Green* and *Red* datasets**

Название экспедиции	Источник		
	<i>Green</i>	<i>Red</i>	Легенда к рис. 1 и 3
RV Akademic, 2005	12	4	1
T.Oguz, 2001 [11]	7	4	2
НИС Акванавт, 1997 [10]	1	0	3
RV Bilim, 2000	13	4	4
Мониторинг (Чурилова), 1998—2000	30	9	5
НИС Горизонт, 1998	20	6	6
НИС Пр. Водяницкий, 1999	2	2	7
Bulgaria (Moncheva), 1998—2003	80	27	8
Bulgaria (Moncheva), 2003—2009	52	12	9
Все измерения	217	68	x

Flags/masks: *Green*: $R_{rs}(412) > 0 \& f04 \& f06 \& f10 \& f13 \& f20 = 0$ (для *MODIS* дополнительно $\& f30 = 0$); *Red*: $R_{rs}(412) < 0 \mid f04 \mid f06 \mid f10 \mid f13 \mid f20 = 1$, $R_{rs}(412)$ — коэффициент яркости моря в спектральном канале с центральной длиной волны 412 нм (для *MODIS* дополнительно $\mid f30 = 1$).

Таблица 2

**Количество безоблачных ситуаций для сканера *MODIS-Aqua*,
совпадающих с измерениями *in situ* для двух выборок: *Green* и *Red***

**Number of cloudless situations (cases) for the *MODIS-Aqua* instrument,
which coincide with *in situ* measurements for *Green* and *Red* datasets**

Название экспедиции	Источник		
	<i>Green</i>	<i>Red</i>	Легенда к рис. 2 и 4
RV K04, 2011	16	12	10
RV K05, 2011	23	3	11
RV Akademic, 2005	10	10	1
НИС Пр. Водяницкий 67, 2010	6	6	12
НИС Пр. Водяницкий 68, 2010	3	5	13
НИС Пр. Водяницкий 69, 2011	20	10	14
НИС Пр. Водяницкий 70, 2011	9	17	15
НИС Пр. Водяницкий 73, 2012	4	1	16
НИС Пр. Водяницкий 76, 2013	6	2	17
Bulgaria (Moncheva), 2002—2003	10	3	8
Bulgaria (Moncheva), 2003—2012	105	42	9
НИС Пр. Водяницкий 77, 2014	10	5	18
НИС Пр. Водяницкий 78, 2014	0	3	19
НИС Пр. Водяницкий 79, 2015	0	8	20
НИС Пр. Водяницкий 81, 2015	0	3	21
НИС Пр. Водяницкий 82, 2015	0	2	22
Все измерения	222	132	x

с учетом того, что для алгоритмов *SIO* и *MHI* для каждого пиксела рассчитывались две ветки решений [4, 5], т. е. минимальное значение разности по модулю между измерением *in situ* и расчётом по спутниковым данным по всем «веткам решений» для соответствующей модели и по всем пикселах в окрестности измерения *in situ*. Именно это «спутниковое» значение C_a сравнивалось с C_a *in situ*. Для *SeaWiFS* и *MODIS-Aqua* конкретные реализации *Green* и *Red* выборок представлены в табл. 1 и 2 в колонках 2, 3 и 4, а их

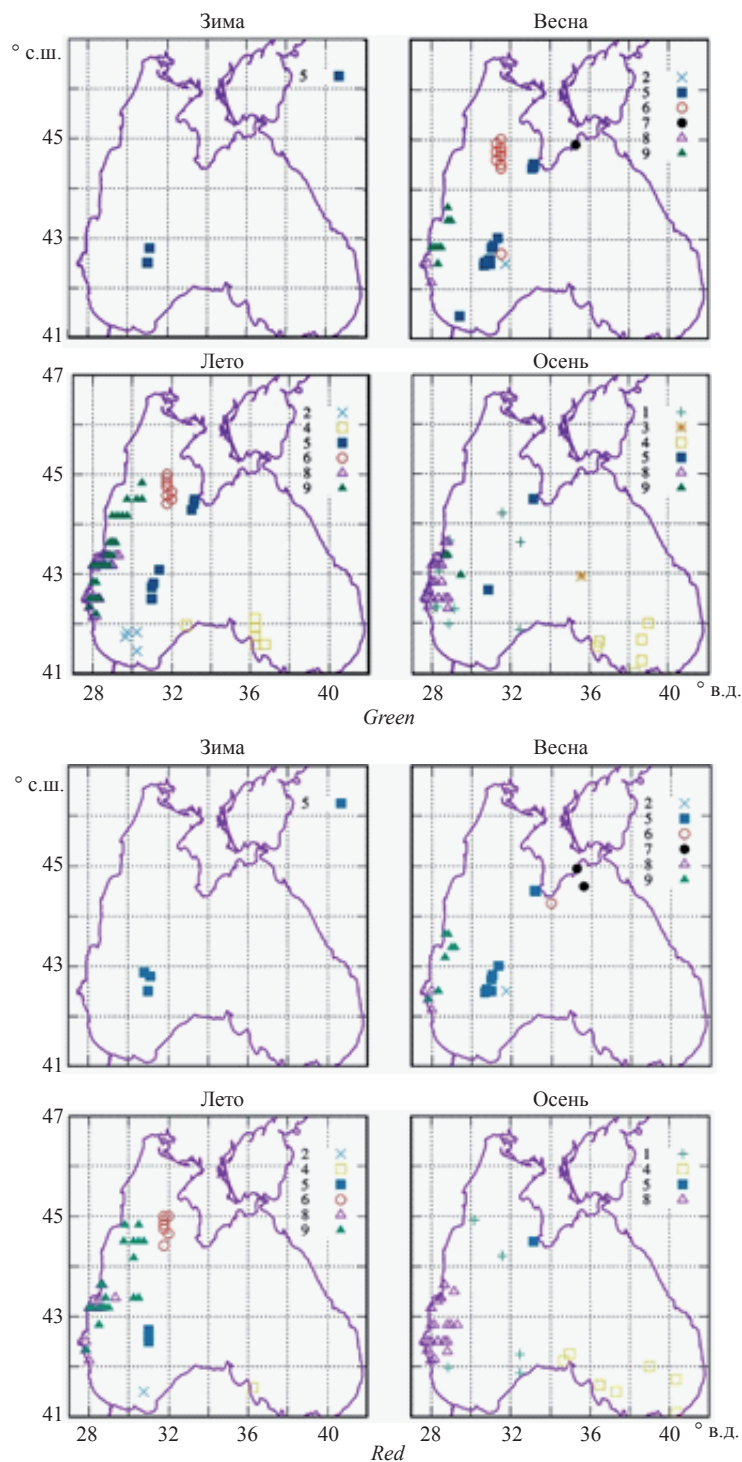


Рис. 1. Пространственное и сезонное распределение измерений *in situ*, совпадающих с безоблачными данными *SeaWiFS* для выборок: *Green* и *Red* (легенда см. табл. 1).

Fig. 1. Spatial and seasonal distribution of *in situ* measured data, coinciding with cloudless *SeaWiFS* data for *Green* and *Red* datasets (comments, see table 1).

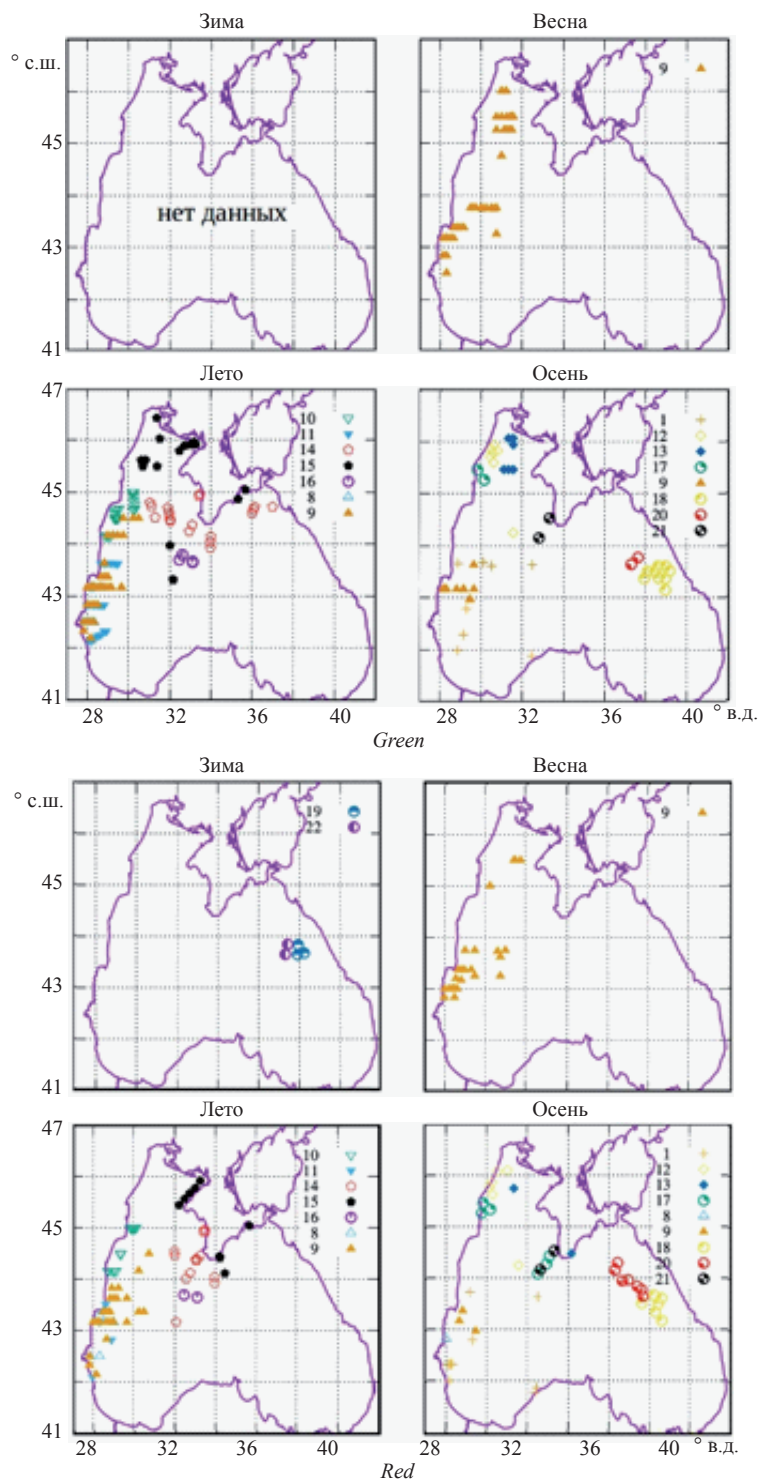


Рис. 2. Пространственное и сезонное распределение измерений *in situ*, совпадающих с безоблачными данными *MODIS-Aqua* для выборок: *Green* и *Red* (легенда см. табл. 2).

Fig. 2. Spatial and seasonal distribution of *in situ* measured data, coinciding with cloudless *MODIS-Aqua* data for *Green* and *Red* datasets (comments, see table 2).

сезонное и пространственное распределение показано на рис. 1 и 2. Как видно из рис. 1 и 2, измерения, хотя и неравномерно, охватывают все четыре сезона и разные районы моря, включая глубоководные и шельфовые области. Таким образом, *Green* и *Red* выборки для приборов *SeaWiFS* и *MODIS-Aqua* можно считать достаточно представительными. Реализация *Green* и *Red* выборок для *MODIS-Terra* качественно близка к реализации соответствующих выборок для *MODIS-Aqua*, поэтому они не показаны.

Результаты. Результаты сравнения трёх алгоритмов представлены на рис. 3, 4 (см. вклейку) и в табл. 3. На рис. 3 и 4 показаны результаты сравнения для полных *Green* и *Red* выборок приборов *SeaWiFS* и *MODIS-Aqua* (рисунок для прибора *MODIS-Terra* опущен, т. к. он близок к рис. 4).

В табл. 3 добавлена статистика для прибора *MODIS-Terra* и рассмотрены отдельно районы северо-западного шельфа и глубоководной части моря. В табл. 3 количественно представлены следующие статистические характеристики результатов сравнения для каждой выборки:

- средняя относительная ошибка по отдельной выборке, δ ;
- коэффициент корреляции, ξ .

Как и следовало ожидать из-за повышенного содержания растворенного органического вещества по сравнению с океаническими водами [4, 5], для глобального алгоритма *NASA* величина δ наибольшая по сравнению с двумя другими алгоритмами. Ее величина лежит в диапазоне от 200 до 400 % для *Green* выборки и от 150 до 350 % для *Red* выборки, т. е. слабо зависит от используемых флагов (см. раздел «Метод»). Региональный алгоритм *SIO* показывает существенно лучший результат по сравнению с алгоритмом *NASA*, величина δ меняется в зависимости от выборки в диапазоне от 50 до 100 %. Заметим, что и этот алгоритм слабо зависит от использования флагов.

Отсутствие существенной разницы между *Green* и *Red* выборками для стандартного алгоритма *NASA std* и регионального алгоритма *SIO* объясняется более весомым вкладом ошибки используемой однопараметрической модели связи между C_a и отношением R_{RS} в двух спектральных каналах, нежели ошибки, связанной с качеством спектра R_{RS} . Наконец, региональный алгоритм *MHI* дает лучшую оценку δ , которая для *Green* выборки лежит в диапазоне от 30 до 50 %. Для этого алгоритма использование флагов является значимым, т. к. диапазон δ для *Red* выборки в среднем выше, либо существенно выше 50 %. Последнее указывает на тот факт, что алгоритм *MHI* чувствителен к качеству спектра R_{RS} , т. к.

Таблица 3

**Результаты сравнения прямых измерений со спутниковым продуктом
для трёх районов Чёрного моря**

**Results of C_a comparison between the in situ measured data and satellite product
for the three regions of the Black Sea**

Район*	Прибор	Тип выборки спутниковых данных					
		Green			Red		
		Алгоритм					
		NASA std	SIO	MHI	NASA std	SIO	MHI
1	SeaWiFS	384/0.47/217**	127/0.71/217	44/0.77/217	264/0.54/68	83/0.74/68	168/0.46/68
	MODIS-Aqua	313/0.42/222	106/0.81/222	38/0.83/222	209/0.61/132	73/0.83/132	92/0.49/132
	MODIS-Terra	301/0.35/205	111/0.68/205	41/0.69/205	343/0.26/185	134/0.71/185	82/0.50/185
2	SeaWiFS	222/0.83/24	61/0.95/24	32/0.95/24	206/0.92/18	70/0.91/18	50/0.78/18
	MODIS-Aqua	281/0.38/70	79/0.89/70	42/0.82/70	189/0.75/31	87/0.81/31	83/0.61/31
	MODIS-Terra	186/0.68/43	73/0.76/43	37/0.84/43	137/0.55/36	49/0.82/36	67/0.68/36
3	SeaWiFS	219/0.60/46	58/0.74/46	30/0.79/46	178/0.72/35	65/0.81/35	251/0.57/35
	MODIS-Aqua	208/0.75/71	91/0.932/71	31/0.96/71	194/0.59/69	84/0.69/69	128/0.10/69
	MODIS-Terra	219/0.71/70	89/0.88/70	31/0.93/70	234/0.22/62	106/0.28/62	60/0.11/62

*1 — все море; 2 — северо-западная часть моря (широта больше 44.5°с.ш.); 3 — глубоководная часть моря (широта 42.3—44.5°с.ш. и долгота 29—39.2°в.д.); **относительная ошибка, %/коэффициент корреляции/число измерений в выборке.

основная его цель — разделение вкладов поглощения фитопланктоном и неживым органическим веществом [5]. Отметим, что ξ , как правило, ведёт себя противоположным образом к δ , т. е. чем больше δ , тем меньше ξ , и наоборот (табл. 3).

Обсудим источники возможных ошибок результатов сравнения, представленных на рис. 3 и 4. Первый, в редких случаях удаётся проанализировать влияние отдельного флага «в чистом виде». Как правило, участвует комбинация «плохих» флагов, которые, действуя разнонаправленно, могут компенсировать ошибки друг друга. Однако это не является предметом исследования данной работы. Второй, если проанализировать маску флага экстремального блика (флаг 4), видно, что при его создании участвует не только геометрия Солнце-Земля-спутник, но и скорость ветра. При учете реальных пространственно-временных характеристик данных ветра и используемых метеоданных с грубым пространственным (0.25°) и временным (3 ч) разрешением высока вероятность того, что эти данные также могут быть источником ошибок, особенно на границе, где флаг меняет свое значение. Третий, даже, если считать, что измерения *in situ* абсолютно точны, сама процедура сравнения со спутниковым измерением содержит много «подводных камней». Укажем на некоторые из них: 1) разница в пространственном разрешении (точечное ~ 1 м для измерений *in situ* и ~ 1 км для спутника); 2) отсутствие совпадения во времени между полевыми и спутниковыми измерениями. Временной критерий (те же самые сутки), который мы использовали в работе из-за недостатка информации, возможно является неоптимальным, особенно в прибрежных районах и на северо-западном шельфе из-за высокой пространственной и временной изменчивости. Мы попытались уменьшить эту ошибку, рассматривая согласованную с процессами в море окрестность вокруг измерения *in situ* и выбирая из спутниковых данных лучшее к контактному наблюдению (см. раздел «Метод»); 3) измерение *in situ* взято с конкретной глубины верхнего слоя, спутник же восстанавливает среднее значение C_a в слое, которое зависит от вертикальной структуры оптических свойств этого слоя [19]. Последнее также могло оказать влияние на конечный результат особенно в прибрежной части и на шельфе, воды которых часто обладают слоистой структурой; 4) ошибки используемых моделей, заложенных в конкретный алгоритм как биооптический, так и алгоритм атмосферной коррекции. Этот список может быть продолжен, поэтому ответ на вопрос «В чем состоит реальная причина ошибок и их относительный вклад в суммарную ошибку?» требует дополнительных исследований.

Кроме того, мы проанализировали набор флагов и масок, который используется при формировании данных Level-3 [18]. Результат для всех алгоритмов и, соответственно, для новой *Green* выборки отличается в худшую сторону по сравнению с нашим набором флагов для старой *Green* выборки (см. комментарии к табл. 1). Как показал анализ, основной причиной ухудшения статистики является отсутствие контроля отрицательных значений R_{RS} в коротковолновых спектральных каналах, что является индикатором плохо выполненной атмосферной коррекции, например, из-за влияния поглощающего аэрозоля [20]. В более ранних версиях спутниковых данных этот критерий был, и он контролировался с помощью флага 8.

Выводы

1. Стандартный алгоритм *NASA*, как правило, завышает значения C_a во всем диапазоне изменчивости C_a в Черном море. Относительная ошибка восстановленного значения C_a слабо зависит от использования флагов, т. е. приблизительно одинакова для *Green* и *Red* выборок, а ее среднее значение колеблется от 200 до 400 % в зависимости от района моря и конкретного прибора.

2. Алгоритм *SIO* имеет такой же наклон в логарифмических координатах, как и стандартный алгоритм *NASA*, но, благодаря сдвигу, в диапазоне C_a от 0.2 до 0.9 мг·м⁻³ дает существенно лучшее согласие с измерениями *in situ*. Среднее значение относительной ошибки лежит в диапазоне от 50 до 100 % и также, как и стандартный алгоритм *NASA*, слабо зависит от *Green* и *Red* выборки.

3. Алгоритм *MHI* имеет лучший результат для *Green* выборки по сравнению с двумя другими алгоритмами. Среднее значение относительной ошибки составило от 30 до 50 %. Отметим высокую чувствительность алгоритма к использованию флагов (т. е. качеству спектра R_{RS}), что отражается в существенном увеличении δ от 70 до 250 % для *Red* выборки. Отметим достаточно большое количество заниженных оценок C_a во всем диапазоне изменчивости.

Работа выполнена в рамках государственных заданий: тема № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза,

прогноза и реанализа состояния морских акваторий» и тема № 0828-2014-0016 «Создание методов и технологий оперативного контроля экологического состояния биоты, оценки и прогноза качества морской среды», а также частично при поддержке РФФИ гранты № 17-05-00113, № 16-05-00076, № 18-45-920070. Авторы выражают признательность анонимному Рецензенту за замечания и уточнения, которые способствовали улучшению понимания выполненной работы.

Литература

1. Финенко З. З. и др. Оценка продуктивности фитопланктона Черного моря по спутниковым данным // Доклады Академии наук. 2010. Т. 432, № 6. С. 845—848.
2. Dorofeev V. et al. The My Ocean Black Sea coupling of dynamics and ecosystem // Mercator Ocean Quarterly Newsletter. January 2011. N 40. P. 26—35.
3. O'Reilly J. E. et al. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3 // NASA Tech. Memo. 2000-206892. 2000. V. 11, S. B. Hooker and E. R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center. 49 p.
4. Kopelevich O. V. et al. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // Deep-Sea Research. Part II: Tropical Studies in Oceanography. 2004. V. 51, N 10—11. P. 1063—1091.
5. Suslin V., Churilova T. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners // International Journal of Remote Sensing. 2016. V. 37, N 18. P. 4380—4400. <http://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>.
6. Суслин В. С. и др. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 года по данным спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 6. С. 44—54.
7. Суслин В. С. и др. Уточненная интерпретация данных наблюдений Черного моря спутниковым прибором SeaWiFS осенью 1998 г. // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 2. С. 68—77.
8. Суслин В. В. и др. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла-а в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7, № 2. С. 24—42.
9. Pope R. M., Fry E. S. Absorption spectrum (380—700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Appl. Opt. 1997. V. 36. P. 8710—8723.
10. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. SeaBASS. <https://seabass.gsfc.nasa.gov/search> (Date of access: 14.10.2017).
11. Oguz T., Ediger D. Comparison of in situ and satellite-derived chlorophyll pigment concentrations, and impact of phytoplankton bloom on the suboxic layer structure in the western Black Sea during May–June 2001 // Deep-Sea Research II. 2006. V. 53. P. 1923—1933.
12. Mitchell B. G. et al. Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved materials and phytoplankton for discrete water samples. Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, 4(4), Inherent Optical Properties: Instruments, Characterization, Field Measurements and Data Analysis Protocols // NASA Tech. Rep. 2003-211621, Goddard Space Flight Cent., Greenbelt, Md. 2003. P. 39—64. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/technical/protocols_ver4_voliv.pdf (Дата обращения: 12.09.2017)
13. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group; (2014): Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Ocean Color Data, NASA OB.DAAC. http://doi.org/10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS_OC.2014.0 (Date of access: 14.10.2017).
14. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data; 2014 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi: 10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0.
15. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra Ocean Color Data; 2014 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi: 10.5067/TERRA/MODIS_OC.2014.0. Accessed on 14.10.2017.
16. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Remote Sensing Reflectance (Rrs). <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/rrs/> (Date of access: 10.05.2017).
17. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Chlorophyll a (chlor_a) Algorithm Description, https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/ (Date of access: 14.10.2017).
18. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Level 2 Ocean Color Flags; flags which will exclude data are listed under «L3 Mask Default». <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/ocl2flags/> (Date of access: 14.10.2017).
19. Suslin V. V., Gurov K. I. Impact of optically active layers in the Black Sea on the quality of retrieved ocean color products: modeling and satellite observations // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104663K (30 November 2017); doi: 10.1117/12.2287386; <http://doi.org/10.1117/12.2287386>.
20. Калинин Д. В., Суслин В. В. Простой метод определения источников приземного аэрозоля на основе результатов анализа обратных траекторий // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 1. С. 59—67.

К статье Суслин В. В. и др. Концентрация хлорофилла-а...

Suslin V. V. et al. Comparison of the black sea chlorophyll-a...

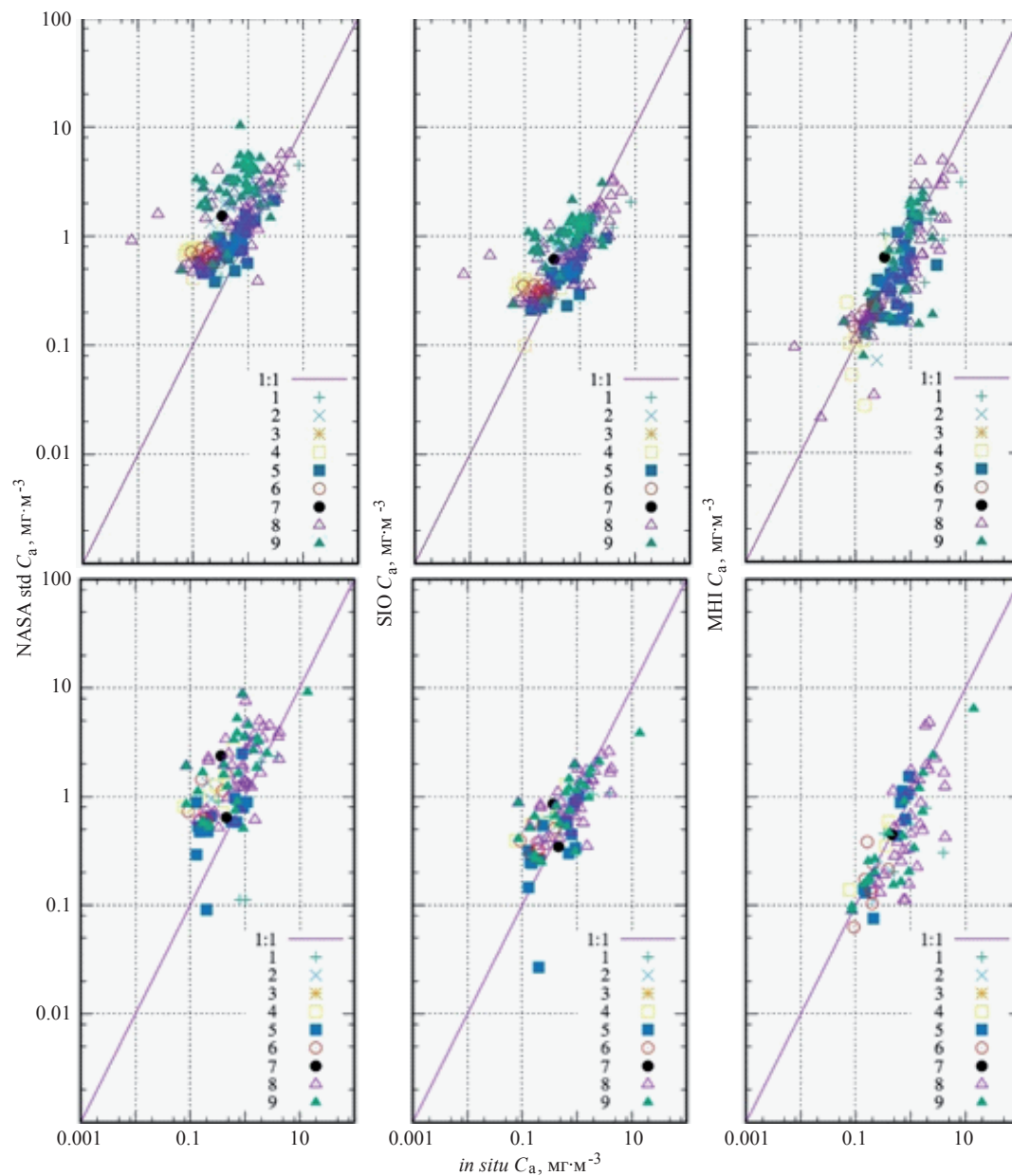


Рис. 3. Результаты сравнения измерений *in situ* между тремя алгоритмами *NASA*, *SIO* и *MHI* для прибора *SeaWiFS* для выборок: *Green* (верхний ряд) и *Red* (нижний ряд), легенда см. табл. 1.

Fig. 3. Results of C_a comparison between *in situ* measured data and data simulated by the *NASA*, *SIO*, and *MHI* algorithms for *SeaWiFS* instrument for *Green* (upper panel) and *Red* (lower panel) datasets, comments see in the Table. 1.

К статье Суслин В. В. и др. Концентрация хлорофилла-а...

Suslin V. V. et al. Comparison of the black sea chlorophyll-a...

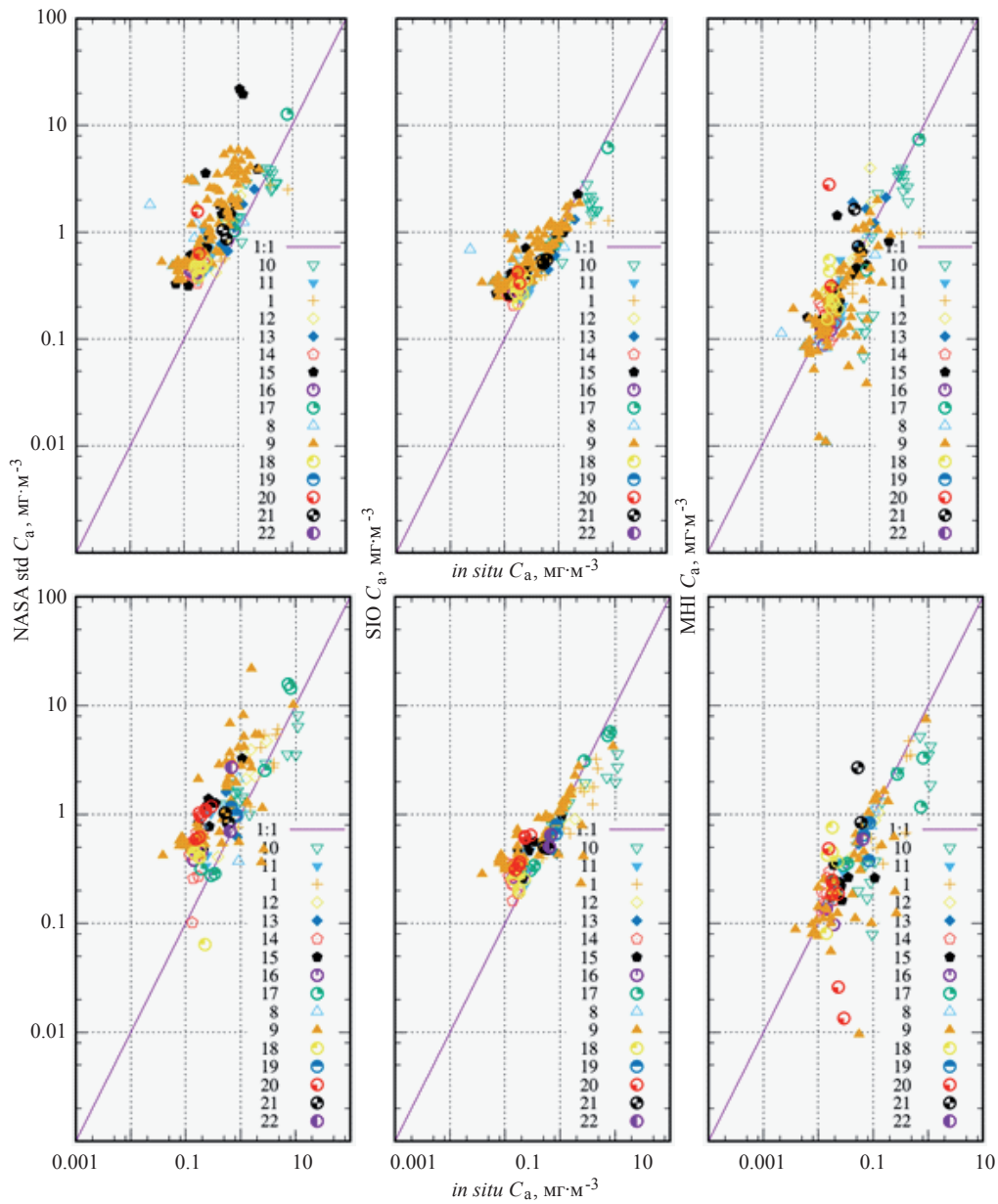


Рис. 4. Результаты сравнения измерений *in situ* между тремя алгоритмами *NASA*, *SIO* и *MHI* для прибора *MODIS-Aqua* для выборок: *Green* (верхний ряд) и *Red* (нижний ряд), легенда см. табл. 2.

Fig. 4. Results of C_a comparison between *in situ* measurements and data simulated by the *NASA*, *SIO*, and *MHI* algorithms for *MODIS-Aqua* for *Green* (upper panel) and *Red* (lower panel) datasets, comments see Table. 2.