

УДК 581.132.1:551.46.08(262.5)

**СРАВНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *A*,  
ВОССТАНОВЛЕННЫХ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА MODIS-AQUA,  
С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ ЧЁРНОГО МОРЯ  
В РАЙОНЕ СЕВАСТОПОЛЯ**

© 2019 г. **Е. Ю. Скороход, Т. В. Ефимова, Н. А. Моисеева,  
Е. А. Землянская, Т. Я. Чурилова**

Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,  
Севастополь, Российская Федерация  
E-mail: [e.skorokhod.sev@gmail.com](mailto:e.skorokhod.sev@gmail.com)

Поступила в редакцию 01.07.2019; после доработки 07.10.2019;  
принята к публикации 25.12.2019; опубликована онлайн 30.12.2019.

Представлены результаты сравнения значений, которые были получены с помощью стандартного спутникового продукта «Концентрация хлорофилла *a*», восстановленных по данным со спектрорадиометра MODIS-Aqua, с данными натурных измерений в прибрежных водах Чёрного моря в районе г. Севастополя с 2009 по 2019 г. в рамках регулярного биооптического мониторинга. Установлены различия между сезонами в характере ошибки стандартного спутникового продукта «Концентрация хлорофилла *a*» при использовании стандартного алгоритма NASA: в весенний период отмечено существенное занижение значений стандартного спутникового продукта «Концентрация хлорофилла *a*» (до 2,1 раза) при высоких концентрациях хлорофилла *a* по результатам натурных измерений, а летом — существенное завышение (до 3,8 раза) при малых концентрациях. На протяжении всего года в зависимости от сезона ошибка в определении стандартного спутникового продукта «Концентрация хлорофилла *a*» в среднем изменялась от  $\pm 24\%$  до  $\pm 51\%$ . Для повышения точности определения концентрации хлорофилла *a* при дистанционном зондировании необходимо применение регионального подхода.

**Ключевые слова:** хлорофилл *a*, дистанционное зондирование, стандартный спутниковый продукт, MODIS-Aqua, прибрежные воды, Чёрное море

Концентрация хлорофилла *a* (далее —  $C_a$ ) в поверхностном слое моря является одним из ключевых параметров оценки продуктивности вод [6, 9, 13, 22]. Его можно оперативно определять при помощи дистанционного зондирования, в частности на основе данных спектрорадиометра, расположенного на борту спутника Aqua (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aboard the Aqua Satellite, MODIS-Aqua). В основу алгоритмов расчёта стандартных спутниковых продуктов [16] заложены биооптические показатели океанических вод 1-го типа [18], однако закономерности формирования спектра излучения, восходящего из водной толщи Мирового океана, различны. Прибрежные воды разных акваторий требуют особого внимания в связи с высоким содержанием и большой вариабельностью концентраций взвешенного и растворённого органического вещества [8]. Кроме того, для прибрежных вод Чёрного моря отмечено превалирование растворённого органического вещества (colored dissolved organic matter, далее — CDOM) и неживой взвеси (non-algal particles, далее — NAP) в поглощении света в море [1, 3, 11].

Различия между закономерностями, характерными для конкретной акватории, и закономерностями, заложенными в стандартные алгоритмы, — одна из причин наблюдаемого некорректного отображения годовой динамики  $C_a$  в Чёрном море при использовании спутниковых данных [12]. Отмечено, что в глубоководной части моря различия между данными спутникового продукта и результатами измерений *in situ* не являются однотипными в сезонном аспекте: зафиксированы завышение величин  $C_a$  в летнее время и занижение — в период зимне-весеннего цветения фитопланктона [6].

Между тем в прибрежных водах ранее не проводили систематических работ по сравнению натуральных и смоделированных значений  $C_a$  в пределах одной станции на протяжении длительного периода времени. При этом актуальность оперативного контроля состояния прибрежных вод с помощью данных дистанционного зондирования в настоящее время возрастает, что связано с увеличением антропогенной нагрузки на береговую линию, в частности в районе г. Севастополя.

Благодаря регулярному биооптическому мониторингу, проводимому с февраля 2009 г. в прибрежных водах Севастополя, сформирован хороший массив данных для сопоставления со значениями, полученными со спутникового продукта, и выяснения причин несоответствия спутниковых оценок результатам натуральных измерений в разные сезоны.

Цель настоящей работы — сравнить данные спутникового продукта «Концентрация хлорофилла  $a$ » с результатами измерений *in situ* в прибрежных водах Чёрного моря в районе г. Севастополя в отдельные сезоны.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для реализации поставленной цели необходимо сформировать две выборки (с данными дистанционного зондирования и с результатами натуральных наблюдений), а затем — единый массив данных.

**Данные *in situ*.** Пробы отбирали в поверхностном слое Чёрного моря вблизи бух. Севастопольская на станции с координатами 44°37'26" с. ш., 33°26'05" в. д. один раз в две недели с февраля 2009 г. по март 2019 г.

Измерения концентрации хлорофилла  $a$  *in situ* (далее —  $C_{a-i}$ ) проводили спектрофотометрическим методом [15, 17] сразу после отбора проб. Их собирали на стекловолокнистых фильтрах GF/F, используя фильтрацию со слабым вакуумом (< 0,2 атм). Затем пробы помещали в раствор ацетона (90 %), гомогенизировали и оставляли на 8 ч в холодильной камере, после чего центрифугировали (5 мин. на скорости 3000 об·мин.<sup>-1</sup>). Осветлённый экстракт пигментов наливали в кювету. Далее производили спектральные измерения оптической плотности до и после подкисления экстракта несколькими каплями раствора соляной кислоты (концентрация кислоты в экстракте — 3–5 ммоль·дм<sup>-3</sup>) в ацетоне. В 2009–2015 гг. измерения проводили на двулучевом спектрофотометре Specord M40 (Carl Zeiss Jena), а с 2015 г. — на двулучевом спектрофотометре Lambda 35 (Perkin Elmer).

**Спутниковые данные.** При анализе использовали спутниковые данные 10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2018 [19], которые были получены со спектрорадиометра, расположенного на борту спутника Aqua, в которых XX.XXXX — идентификатор цифрового объекта, а YYYY — год последнего обновления данных. Пространственное разрешение данных составляет 1 км в надири. L2 обозначает данные второго уровня, которые включают время измерения, географическую привязку и ряд стандартных продуктов, в том числе концентрацию хлорофилла  $a$  ( $C_{a-ma}$ , мг·м<sup>-3</sup>), рассчитанную на основе объединения двух алгоритмов — OCx (chl\_oc4) [20] и Hu Color Index (CI) (chl\_hu) [14, 21].

При формировании единого массива данных, сопоставляющего  $C_{a-i}$  и  $C_{a-ma}$ , руководствовались условием: спутниковые и *in situ* измерения должны быть выполнены в один календарный день для минимизации влияния временной изменчивости. Спутниковые данные выбирали вокруг станции измерений *in situ* в пределах области ±0°0'32" с. ш., ±0°0'54" в. д. Выбор такой области обусловлен вариативностью расположения пикселя относительно координат и разницей во времени спутниковых

и *in situ* измерений. При выборе спутниковых данных руководствовались географической приближенностью к точке измерений *in situ*. При отсутствии спутниковых данных в выбранной области значения  $C_{a-ma}$  получали путём аппроксимации значений соседних пикселей.

Данные, помеченные критичным флагом «Солнечный блик: отражательная способность превышает порог» (Sunglint: reflectance exceeds threshold, HIGLINT), были исключены из-за их ненадёжности. Данные с флагом «Возможен шум за счёт рассеянного света» (Probable stray light contamination, STRAYLIGHT) оставили для увеличения выборки данных для сравнения.

Абсолютную погрешность оценивали по разнице между измеренным и истинным значениями величины, где за истинное значение величины  $C_a$  принимали значение измерения  $C_{a-i}$ :

$$\Delta = \Delta C_a = C_{a-ma} - C_{a-i} . \quad (1)$$

Относительную погрешность находили из равенства:

$$\delta = \frac{\Delta C_a}{C_{a-i}} \times 100\% . \quad (2)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Сформирован массив данных  $C_a$ , включающий результаты дистанционного зондирования ( $C_{a-ma}$ ) и измерений *in situ* ( $C_{a-i}$ ). В нём наименьшее относительное количество дней с квазисинхронными измерениями  $C_{a-ma}$  и  $C_{a-i}$  приходится на зиму — 21 % (табл. 1). При этом в зимний период данные  $C_{a-ma}$  помечены наибольшим разнообразием флагов. Рассчитанные величины относительной погрешности (от -29 % до +61 % при средней относительной погрешности  $\pm 24$  %) свидетельствуют о более близком совпадении значений  $C_{a-i}$  и  $C_{a-ma}$  в зимние месяцы, чем в другие сезоны (рис. 1).

**Таблица 1.** Отклонение значений концентрации хлорофилла *a*, которые получены со спектро радиометра, расположенного на борту спутника Aqua ( $C_{a-ma}$ ), от значений концентрации хлорофилла *a in situ* ( $C_{a-i}$ )

**Table 1.** The deviation of the chlorophyll *a* concentration values obtained from the spectroradiometer aboard the Aqua satellite ( $C_{a-ma}$ ) from the *in situ* chlorophyll *a* concentration values ( $C_{a-i}$ )

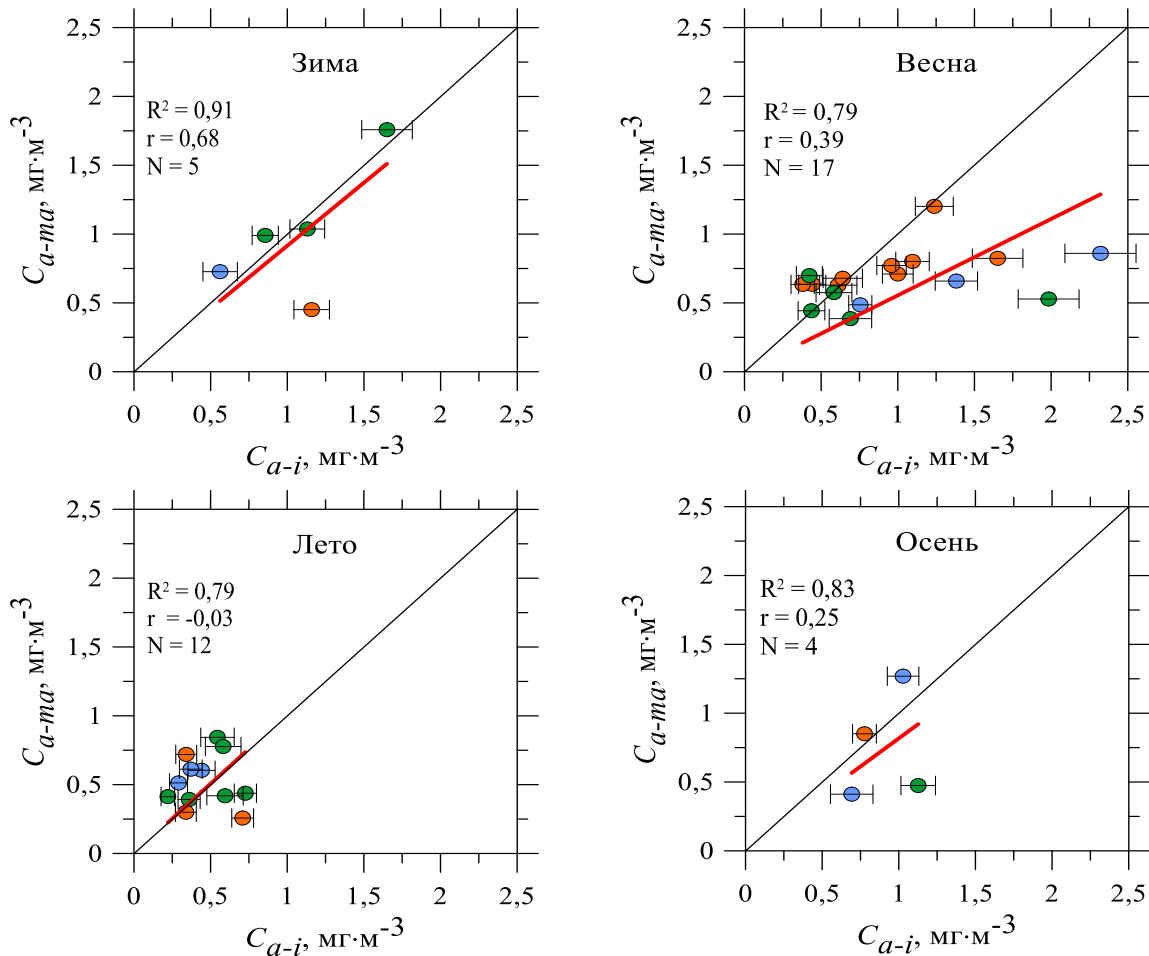
Показатель	Время года				Год
	зима	весна	лето	осень	
Количество дней с данными $C_{a-i}$	24	34	20	18	96
Количество дней с данными $C_{a-ma}$	5	17	12	4	38
Относительное количество дней с квазисинхронными измерениями $C_{a-ma}$ и $C_{a-i}$ , %	21	50	60	22	40
Максимальная абсолютная погрешность $C_{a-ma}$ , $\Delta_{max}$ , мг·м <sup>-3</sup>	0,71	-1,5	-0,45	-0,65	-1,5
Средняя абсолютная погрешность $C_{a-ma}$ , $\Delta_{cp}$ , мг·м <sup>-3</sup>	$\pm 0,24$	$\pm 0,39$	$\pm 0,22$	$\pm 0,31$	$\pm 0,31$
Максимальная относительная погрешность $C_{a-ma}$ , $\delta_{max}$ , %	61	-73	111	-58	111
Средняя относительная погрешность $C_{a-ma}$ , $\delta_{cp}$ , %	$\pm 24$	$\pm 34$	$\pm 51$	$\pm 33$	$\pm 38$

Весной значения  $C_{a-ma}$  существенно занижены относительно  $C_{a-i}$  (рис. 1). Для этого периода отмечена самая большая абсолютная погрешность (табл. 1). В 88 % случаев при измерениях весной была возможна облачность, что сказывалось на точности спутниковых измерений.

Лето — наиболее обеспеченный данными сезон; относительное количество дней с квазисинхронными измерениями — 60 %. Для спутниковых данных в этот период года характерны наименьшие абсолютные погрешности при невысоких значениях  $C_{a-i}$  (0,3–0,8 мг·м<sup>-3</sup>). При этом средняя относительная погрешность измерений  $C_{a-ma}$  составляет  $\pm 51$  %, что на 27 % превышает среднюю относительную погрешность  $C_{a-ma}$  в зимний период ( $\pm 24$  %).

Осень, как и зима, представлена меньшим количеством пар данных, чем весна и лето. Относительное количество дней с квазисинхронными измерениями  $C_{a-ma}$  и  $C_{a-i}$  в этот период — 22 %. При этом средняя относительная погрешность составляет  $\pm 33$  %.

Анализ по сезонам показал, что в среднем спутниковые оценки  $C_a$  имеют относительную погрешность в диапазоне от  $\pm 24$  до  $\pm 51$  %. Сравнение точности дистанционных оценок по сезонам позволило выявить тренд в увеличении ошибки от её наименьшей величины ( $\pm 24$  %), отмеченной зимой, к средним значениям ( $\pm 33$  и  $\pm 34$  %), полученным для осени и весны соответственно, и к наибольшей величине ошибки ( $\pm 51$  %), зафиксированной в летний период (табл. 1).



**Рис. 1.** Сравнение значений концентрации хлорофилла  $a$ , восстановленных по данным со спектрорадиометра MODIS-Aqua ( $C_{a-ma}$ ), со значениями концентрации хлорофилла  $a$  *in situ* ( $C_{a-i}$ ) в отдельные сезоны. Первый месяц сезона — синий символ, второй месяц — оранжевый, третий месяц — зелёный. Красная линия — линейная регрессия; чёрная линия (диагональ) соответствует равнозначности сравниваемых значений

**Fig. 1.** Comparison of the chlorophyll  $a$  concentration values retrieved from spectroradiometer MODIS-Aqua data ( $C_{a-ma}$ ) with *in situ* chlorophyll  $a$  concentration values ( $C_{a-i}$ ) at particular seasons. The first month of the season – blue symbol; the second month – orange; the third month – green. Red line – linear regression; black line (diagonal) corresponds to equivalence of compared values

Несмотря на близкие значения средних относительных погрешностей, различия между результатами измерений  $C_{a-ma}$  и  $C_{a-i}$  не являются однотипными на протяжении года. Весной значения  $C_{a-ma}$  ( $0,39$ – $1,2$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ) существенно занижены относительно результатов природных наблюдений  $C_{a-i}$  ( $0,38$ – $2,3$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ). При этом наибольшие отклонения отмечены при высоких  $C_{a-i}$  ( $> 1$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ). Точность определения  $C_{a-ma}$  менялась от  $-73$  до  $+67$  % и в среднем составила  $\pm 34$  %.

В летний период величины  $C_{a-i}$  изменялись, по результатам мониторинга *in situ*, в диапазоне  $0,22-0,73 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . По данным дистанционного зондирования получено изменение  $C_{a-ma}$  в диапазоне  $0,26-0,84 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Несмотря на сопоставимость диапазонов варибельности  $C_{a-ma}$  и  $C_{a-i}$ , сравнение пар данных показало существенное завышение значений  $C_{a-ma}$  при малых величинах  $C_{a-i}$  ( $0,2-0,3 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ). В этот сезон точность спутниковых оценок  $C_a$  изменялась от  $-64 \%$  до  $+111 \%$  и в среднем составила  $\pm 51 \%$ . Следует отметить хорошее обеспечение парами данных в целом за год. Количество дней с квазисинхронными измерениями  $C_{a-ma}$  и  $C_{a-i}$  составило  $40 \%$ .

Самым распространённым флагом является «Возможно наличие облачности или льда» (Probable cloud or ice contamination, CLDICE).

Связь между *in situ* и спутниковыми значениями  $C_a$  слабая, а в летний сезон она практически отсутствует (рис. 1). Наибольшая корреляционная связь между  $C_{a-ma}$  и  $C_{a-i}$  наблюдается в зимний период ( $r = 0,68$ ).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Прибрежные воды Мирового океана характеризуются большим разнообразием оптических показателей [8], при этом оптически активные компоненты (хлорофилл (Chl), NAP и CDOM) не являются ковариантными. Их пропорции меняются более чем на порядок в зависимости от особенностей водной среды, влияя на биооптические показатели вод [8]. В связи с тем, что большинство моделей базируется на  $C_a$ , точность определения  $C_a$  будет сказываться и на точности других моделей [10]. Это обосновывает необходимость проверки точности оценки других стандартных спутниковых продуктов и выявления их взаимосвязей с концентрацией хлорофилла  $a$ .

Сравнение натуральных и спутниковых значений  $C_a$  в других акваториях [2, 7] свидетельствует о неточности определения  $C_a$  при помощи стандартного алгоритма NASA. Для Японского моря показано [7], что спутниковые оценки завышают  $C_a$  во время зимне-весеннего цветения фитопланктона. Завышение значений  $C_a$  характерно и для Карского моря [2]. Сравнение результатов измерений  $C_{a-ma}$  и  $C_{a-i}$  в прибрежных водах г. Севастополя в течение года позволило не только выявить большие расхождения, но и установить сезонные отличия по знаку ошибки: летом отмечено завышение значений  $C_a$  до 2,1 раза, а весной — занижение  $C_a$  до 3,8 раза (рис. 1).

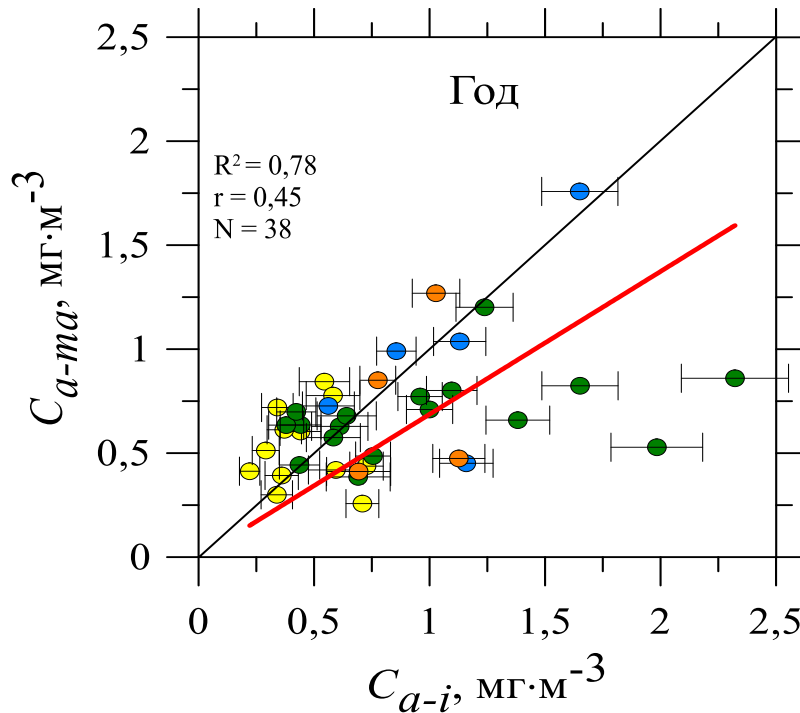
Завышение значений  $C_a$  в Карском море авторы объясняют тем, что стандартный алгоритм относит поглощение света CDOM на счёт пигментов фитопланктона [2]. Занижение значений  $C_a$  во время весеннего цветения фитопланктона в прибрежных водах г. Севастополя свидетельствует о более серьёзной проблеме, связанной с работой стандартного спутникового алгоритма. Для его корректировки следует не только определить закономерности варибельности поглощения света фитопланктоном, NAP и CDOM, но и точно обозначить акватории (так называемые провинции), для которых эти закономерности типичны [8].

В осенне-зимний период данные отличаются наибольшим разнообразием флагов. Чаще всего на протяжении года встречается CLDICE, но, так как воды Чёрного моря не подвержены замерзанию [4], этот флаг можно рассматривать исключительно как индикатор наличия облачности. Уменьшение количества спутниковых данных при квазисинхронных измерениях осенью и зимой, а также максимальное разнообразие встречающихся флагов в этот период связаны с влиянием погодных условий. Отмеченные объективные причины лимитируют количество данных осенью и зимой (число квазисинхронных измерений составляет одну-две пары в месяц), что осложняет определение характера соотношений между спутниковыми и реальными величинами  $C_a$ .

Установленные в настоящей работе различия между сезонами в характере (в знаке) ошибки стандартного спутникового продукта «Концентрация хлорофилла  $a$ » свидетельствуют о том, что применяемый стандартный алгоритм (NASA) не воспроизводит сезонную изменчивость соотношения между фитопланктоном и другими оптическими компонентами среды (CDOM, NAP) [1, 11] достаточно точно для разных районов Мирового океана [5, 23]. Для всего массива данных (без разделения



на сезоны) значения стандартного продукта хорошо коррелируют с результатами природных наблюдений ( $R^2 = 0,78$ ) (рис. 2). Фактически завышение и занижение в отдельные сезоны привело к разбросу данных, но при этом завышение частично «скомпенсировало» занижение. Из-за изменения в течение года в знаке ошибки сравнение без разделения на сезоны может некорректно отражать ситуацию в исследуемой акватории.



**Рис. 2.** Сравнение значений концентрации хлорофилла  $a$ , восстановленных по данным спектро радиометра MODIS-Aqua ( $C_{a-ma}$ ), со значениями концентрации хлорофилла  $a$  *in situ* ( $C_{a-i}$ ) на протяжении года. Зима — синий символ; весна — зелёный; лето — жёлтый; осень — оранжевый. Красная линия — линейная регрессия; чёрная линия (диагональ) соответствует равнозначности сравниваемых значений

**Fig. 2.** Comparison of the chlorophyll  $a$  concentration values retrieved from spectroradiometer MODIS-Aqua ( $C_{a-ma}$ ) with *in situ* chlorophyll  $a$  concentration values ( $C_{a-i}$ ) throughout the year. Winter – blue symbol; spring – green; summer – yellow; autumn – orange. Red line – linear regression; black line (diagonal) corresponds to equivalence of compared values

Разный характер неточности спутниковых оценок  $C_a$ , отмеченный в период одинакового явления (цветения фитопланктона), но в разных акваториях (завышение  $C_a$  фитопланктона в Японском море [7] и занижение в Чёрном море) (рис. 1), подчёркивает необходимость регионального подхода в решении этой проблемы. Использование регионального трёхканального алгоритма для расчёта стандартных продуктов [5] позволит повысить точность определения содержания хлорофилла  $a$  на основе учёта характера связи между хлорофиллом (Chl) и пигментами фитопланктона (aph), а также её изменчивости под влиянием факторов среды [6] в прибрежных водах. Учёт различий в способности фитопланктона поглощать солнечную энергию в отдельные сезоны в поверхностных водах, отличающихся по содержанию и соотношению основных оптически активных компонентов среды, позволит прийти к получению достоверной оценки  $C_a$  при дистанционном зондировании Чёрного моря на масштабе всего бассейна.

#### Выводы:

1. Восстановленные по данным со спектро радиометра MODIS-Aqua при помощи стандартного алгоритма NASA значения концентрации хлорофилла  $a$  некорректно отображают годовую динамику этого параметра, сглаживая сезонный ход.

2. Погрешности значений стандартного продукта, определённые в результате расчётов по стандартному двухканальному алгоритму, в зависимости от сезона в среднем составляют от  $\pm 24\%$  до  $\pm 51\%$ . Использование регионального трёхканального алгоритма, учитывающего соотношения между концентрацией хлорофилла *a* и поглощением света пигментами фитопланктона, а также соотношения между основными оптически активными компонентами среды, позволит уточнить оценку концентрации хлорофилла *a* в прибрежных водах по спутниковым данным.
3. Результаты исследования свидетельствуют о целесообразности проведения аналогичного сравнения для других стандартных спутниковых продуктов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение пространственно-временной организации водных и сухопутных экосистем с целью развития системы оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий» (№ гос. регистрации АААА-А19-119061190081-9), а также при поддержке РФФИ (грант № 18-45-920070).*

**Благодарность.** Авторы благодарят к. ф.-м. н., с. н. с., руководителя отдела динамики океанических процессов В. В. Суслина (ФИЦ МГИ, г. Севастополь) за помощь в работе со спутниковыми данными и м. н. с. Е. Г. Сахонь (ФИЦ ИнБЮМ, г. Севастополь) — за помощь в отборе проб при регулярном биооптическом мониторинге в бух. Севастопольская. Также авторы выражают благодарность Goddard Space Flight Center (GSFC) и Ocean Biology Processing Group (OBPG) (NASA) за предоставленные данные и их предварительную обработку и двум анонимным рецензентам — за замечания и советы, позволившие значительно улучшить статью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ефимова Т. В., Чурилова Т. Я., Моисеева Н. А., Землянская Е. А. Вариабельность биооптических показателей прибрежных вод Черного моря в районе Севастополя // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)* : материалы 16-й Всерос. открытой конф., Москва, 12–16 ноября 2018 г. Москва : ИКИ РАН, 2018. С. 264. [Efimova T. V., Churilova T. Ya., Moiseeva N. A., Zemlianskaia E. A. Variabel'nost' bioopticheskikh pokazatelei pribrezhnykh vod Chernogo morya v raione Sevastopolya. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (Fizicheskie osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okruzhayushchei sredy, potentsial'no opasnykh yavlenii i ob'ektov)* : materialy 16-i Vseros. otkrytoi konf., Moscow, Nov. 12–16, 2018. Moscow : IKI RAS, 2018, pp. 264. (in Russ.)]
2. Кузнецова О. А., Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Буренков В. И., Мошаров С. А., Демидов А. Б. Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-Aqua // *Исследование Земли из космоса*. 2013. № 5. С. 21–31. [Kuznetsova O. A., Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Burenkov V. I., Demidov A. B., Mocharov S. A. Estimation of chlorophyll concentration in the Kara Sea from data of MODIS-Aqua satellite scanner. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, vol. 5, pp. 21–31. (in Russ.)]. <http://dx.doi.org/10.7868/S0205961413050023>
3. Моисеева Н. А., Чурилова Т. Я., Ефимова Т. В., Кривенко О. В., Латушкин А. А. Поглощение света пигментами фитопланктона, взвешенным веществом и окрашенным растворенным органическим веществом в прибрежных водах Крыма (Черное море) в июне 2016 // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы* : материалы XXIII Междунар. симп., Иркутск, 03–07 июля 2017 г. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2017. С. 137–140. [Moiseeva N. A., Churilova T. Ya., Efimova T. V., Krivenko O. V., Latushkin A. A. Pogloshchenie sveta pigmentami fitoplanktona, vzheshennym veshchestvom i okrashennym rastvorennym organicheskim veshchestvom v pribrezhnykh vodakh Kryma (Chernoje more) v iyune 2016. *Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery* : materialy XXIII Mezhdunar. simpoz., Irkutsk, July 03–07, 2017. Tomsk : Izd-vo IOA SO RAN, 2017, pp. 137–140. (in Russ.)]
4. Полонский А. Б., Шокурова И. Г., Белокопытов В. Н. Десятилетняя изменчивость температуры и солености в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2013. № 6. С. 27–41. [Polonskii A. B., Shokurova I. G., Belokopytov V. N.

- Decadal variability of temperature and salinity in the Black Sea. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2013, vol. 6, pp. 27–41. (in Russ.)]
5. 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. Т. 7, № 2. С. 24–42. [Suslin V. V., Churilova T. Ya., Sosik H. M. The SeaWiFS algorithm of chlorophyll *a* in the Black Sea. *Morskoi ekologicheskij zhurnal*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 24–42. (in Russ.)]
  6. Чурилова Т. Я., Суслин В. В., Кривенко О. В., Ефимова Т. В., Моисеева Н. А. Спектральный подход к оценке скорости фотосинтеза фитопланктона в Черном море по спутниковой информации: методологические аспекты развития региональной модели // *Журнал Сибирского государственного университета. Биология*. 2016. Т. 9, вып. 4. С. 367–384. [Churilova T. Ya., Suslin V. V., Krivenko O. V., Efimova T. V., Moiseeva N. A. Spectral approach to assessment of phytoplankton photosynthesis rate in the Black Sea based on satellite information methodological aspects of the regional model development. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2016, vol. 9, iss. 4, pp. 367–384. (in Russ.)] <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-4-367-384>
  7. Штрайхерт Е. А., Захарков С. П., Гордейчук Т. Н., Шамбарова Ю. В. Концентрация хлорофилла-*a* и био-оптические характеристики в заливе Петра Великого (Японское море) во время зимне-весеннего цветения фитопланктона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11, № 1. С. 148–162. [Shtraikhert E. A., Zakharov S. P., Gordeychuk T. N., Shambarova Ju. V. Chlorophyll-*a* concentration and bio-optical characteristics in the Peter the Great Bay (Sea of Japan) during winter-spring phytoplankton bloom. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 1, pp. 148–162. (in Russ.)]
  8. Babin M., Stramski D., Giovanni M. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research*, 2003, vol. 108, iss. C7, pp. 4-1–4-20. <https://doi.org/10.1029/2001JC000882>
  9. Behrenfeld M. J., O'Malley R. T., et al. Reevaluating ocean warming impacts on global phytoplankton. *Nature Climate Change*, 2015, vol. 6, iss. 3, pp. 323–330. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2838>
  10. Campbell J., Antoine D., Armstrong R., Arrigo K., Balch W., Barber R., Behrenfeld M., Bidigare R., Bishop J., Carr M.-E., Esaias W., Falkowski P., Hoepffner N., Iverson R., Kiefer D., Lohrenz S., Marra J., Morel A., Ryan J., Veder-nikov V., Waters K., Yentsch C., Yoder J. Comparison of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature, and irradiance. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, vol. 16, iss. 3, pp. 9-1–9-15. <https://doi.org/10.1029/2001GB001444>
  11. Churilova T., Moiseeva N., Efimova T., Suslin V., Krivenko O., Zemlianskaia E. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in the Crimean coastal waters (the Black Sea). *Proc. SPIE 10466, 23<sup>rd</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2017, vol. 104664B. <https://doi.org/10.1117/12.2288339>
  12. Churilova T., Suslin V., Krivenko O., Efimova T., Moiseeva N., Mukhanov V., Smirnova L. Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the Black Sea: Seasonality and parametrization. *Frontiers in Marine Science*, 2017, vol. 4, article 90 (14 p.). <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00090>
  13. Finenko Z., Churilova T., Lee R. Dynamics of the vertical distributions of chlorophyll and phytoplankton biomass in the Black Sea. *Oceanology*, 2005, vol. 45, iss. 1, pp. 112–126.
  14. Hu C., Lee Z., Franz B. A. Chlorophyll *a* algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research*, 2012, vol. 117, iss. C1, article C01011 (25 p.). <http://doi.org/10.1029/2011JC007395>
  15. Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*<sub>1</sub> and *c*<sub>2</sub> in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie Pflanzen*, 1975, vol. 167, no. 2, pp. 191–194. [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3)
  16. *Level 2 Ocean Color Flags* [Electronic resource]. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/ocl2flags> [accessed 2019.03.20].
  17. Lorenzen C. J. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: Spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*, 1967, vol. 12, iss. 2, pp. 343–346. <http://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>



18. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 1977, vol. 22, iss. 4, pp. 709–722.
19. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data*; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. <http://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2018>
20. O'Reilly J. E., Maritorena S., O'Brien M. C., Siegel D. A., Toole D., Menzies D., Smith R. C., et al. *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Technical Memorandum 2000-206892* / S. B. Hooker, E. R. Firestone (Eds). NASA Goddard Space Flight Center, 2000, vol. 11, 49 p.
21. O'Reilly J. E., Maritorena S., Mitchell B. G., Siegel D. A., Carder K. L., Garver S. A., Kahru M., McClain C. R. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 1998, vol. 103, iss. C11, pp. 24937–24953. <http://doi.org/10.1029/98JC02160>
22. Platt T., Caverhill C., Sathyendranath S. Basin scale estimates of ocean primary production by remote sensing: The North Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 1991, vol. 96, iss. C8, pp. 15147–15159. <https://doi.org/10.1029/91JC01118>
23. 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, vol. 37, iss. 18, pp. 4380–4400. <http://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>

**COMPARISON OF CHLOROPHYLL A CONCENTRATION VALUES  
RETRIEVED FROM MODIS-AQUA SPECTRORADIOMETER  
WITH THE RESULTS OF MEASUREMENTS  
IN THE COASTAL WATERS OF THE BLACK SEA NEAR SEVASTOPOL**

**E. Yu. Skorokhod, T. V. Efimova, N. A. Moiseeva, E. A. Zemlianskaia, and T. Ya. Churilova**

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation  
E-mail: [e.skorokhod.sev@gmail.com](mailto:e.skorokhod.sev@gmail.com)

The results of the comparison of the values of the standard satellite product “Chlorophyll *a* Concentration” recovered from MODIS-Aqua satellite with the results of field measurements in the coastal waters of the Black Sea near Sevastopol from 2009 to 2019 as a part of regular bio-optical monitoring have been presented. Differences between seasons in the nature of the error of the standard satellite product “Chlorophyll *a* Concentration” using the standard NASA algorithm were established: in spring, a significant underestimation of the values of the standard satellite product “Chlorophyll *a* Concentration” (up to 2.1 times) at high chlorophyll *a* concentrations was noted according to the results of the full-scale measurements, and in summer a significant overestimation of the values (up to 3.8 times) at low concentrations was noted. Throughout the year, depending on the season, the error in determining the standard satellite product “Chlorophyll *a* Concentration” on average varied from  $\pm 24\%$  to  $\pm 51\%$ . To increase the accuracy of determining the chlorophyll *a* concentration with remote sensing, it is necessary to use a regional approach.

**Keywords:** chlorophyll *a*, remote sensing, standard satellite product, MODIS-Aqua, coastal waters, Black Sea