

## Биооптические характеристики прибрежных вод Черного моря вблизи Севастополя: оценка точности спутниковых продуктов, восстановленных по данным *MODIS* и *VIIRS*

Е. Ю. Скороход<sup>1</sup>, ✉, Т. Я. Чурилова<sup>1</sup>, Т. В. Ефимова<sup>1</sup>,  
Н. А. Моисеева<sup>1</sup>, В. В. Суслин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ [elenaskorokhod@ibss-ras](mailto:elenaskorokhod@ibss-ras)

Поступила в редакцию 16.04.2020 г., после доработки – 26.10.2020 г.

**Цель.** Цель работы – оценить точность спутниковых продуктов для прибрежных вод Севастополя, восстановленных стандартными алгоритмами по данным спектрорадиометров *MODIS*, установленных на искусственных спутниках Земли *Aqua* и *Terra*, и *VIIRS* на спутнике *Suomi NPP*. **Методы и результаты.** Отбор проб *in situ* проводился на станции, расположенной на расстоянии двух миль от бухты Севастопольской в точке с координатами 44° 37' 26" с. ш. и 33° 26' 05" в. д. Для определения концентрации хлорофилла *a* использовали спектрофотометрический метод. Спектральные показатели поглощения света оптически активными компонентами измеряли в соответствии с современным протоколом *NASA*. Использовались данные *MODIS* и *VIIRS* 2-го уровня с пространственным разрешением 1 км вокруг станции. Обработку спутниковых данных проводили при помощи программного обеспечения *SeaDAS 7.5.3*, разработанного *NASA*. Исследование показало, что содержание оптически активных компонентов в прибрежных водах Севастополя по данным *MODIS* и *VIIRS* при использовании стандартных алгоритмов определяется некорректно: в сравнении с данными измерений *in situ* значения концентрации хлорофилла *a* в среднем весной меньше в 1,6 раза, а летом – больше в 1,4 раза; вклад пигментов фитопланктона в общее поглощение света на длине волны 443 нм в среднем меньше в 8,7 раза; поглощение света окрашенным растворенным органическим веществом в сумме с неживой взвесью в среднем больше в 2,2 раза.

**Выводы.** Стандартные алгоритмы *NASA* не применимы для расчета биооптических показателей вод (концентрация хлорофилла *a*, показатель поглощения света пигментами фитопланктона и показатель поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом в сумме с неживой взвесью) в прибрежном районе Черного моря вблизи Севастополя. Чтобы использовать спутниковые данные для экологического мониторинга, необходимо развивать региональный алгоритм, учитывающий оптические особенности вод в этом районе, в частности в сложной прибрежной зоне.

**Ключевые слова:** хлорофилл *a*, фитопланктон, окрашенное растворенное органическое вещество, неживое взвешенное вещество, дистанционное зондирование, *MODIS*, *VIIRS*, Черное море

**Благодарности:** работа выполнена по теме ГЗ № АААА-А19-119061190081-9 и при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-45-920070. Авторы выражают глубокую признательность м. н. с. Е. Г. Сахоню и вед. инженеру Е. А. Землянской (ФИЦ ИнБИОМ, г. Севастополь) за помощь в отборе проб при регулярном биооптическом мониторинге в бухте Севастопольской. Также авторы благодарят *Goddard Space Flight Center* и *Ocean Biology Processing Group (NASA)* за предоставленные данные и их предварительную обработку.

**Для цитирования:** Биооптические характеристики прибрежных вод Черного моря вблизи Севастополя: оценка точности спутниковых продуктов, восстановленных по данным *MODIS* и *VIIRS* / Е. Ю. Скороход [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 233–246. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-233-246

© Скороход Е. Ю., Чурилова Т. Я., Ефимова Т. В., Моисеева Н. А., Суслин В. В., 2021

# Bio-Optical Characteristics of the Black Sea Coastal Waters near Sevastopol: Assessment of the MODIS and VIIRS Products Accuracy

E. Yu. Skorokhod <sup>1, ✉</sup>, T. Ya. Churilova <sup>1</sup>, T. V. Efimova <sup>1</sup>,  
N. A. Moiseeva <sup>1</sup>, V. V. Suslin <sup>2</sup>

<sup>1</sup> A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Science, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Science, Sevastopol, Russia  
✉ elenaskorokhod@ibss-ras

**Purpose.** The purpose of the work is to evaluate accuracy of the satellite products for the coastal waters near Sevastopol, reconstructed by the standard algorithms based on the MODIS and VIIRS (installed at the artificial Earth satellites *Aqua* and *Terra*, and at *Suomi NPP*, respectively) data.

**Methods and Results.** *In situ* sampling was carried out at the station (44°37'26" N and 33°26'05" E) located at a distance of two miles from the Sevastopol Bay. The chlorophyll *a* concentration was measured by the spectrophotometric method. The spectral light absorption coefficients by optically active components were measured in accordance with the current NASA protocol. The spectroradiometers MODIS and VIIRS Level 2 data with spatial resolution 1 km in nadir around the *in situ* station (44°37'26"±0°00'32" N and 33°26'05"±0°00'54" E) were used. The satellite products were processed by the SeaDAS 7.5.3 software developed in NASA. The research showed that the standard NASA algorithms being applied to the MODIS and VIIRS data, yielded incorrect values of the optically active components' content in the Black Sea coastal waters near Sevastopol as compared to the data of *in situ* measurements in the same region: the satellite-derived "chlorophyll *a* concentration" was on average 1.6 times lower in spring, and 1.4 times higher in summer; the contribution of phytoplankton pigments to total light absorption at 443 nm was underestimated in 8.7 times; the light absorption by colored detrital organic matter was overestimated in 2.2 times.

**Conclusions.** The NASA standard algorithms are inapplicable to calculating bio-optical indices in the coastal waters of the Black Sea near Sevastopol since they provide incorrect values of the satellite products ( $C_{a-s}$ ,  $a_{ph-s}(443)$  and  $a_{CDM-s}(443)$ ). Operative ecological monitoring based on satellite data requires development of a regional algorithm taking into account the seawater optical features in the region and in the coastal zone, in particular.

**Keywords:** chlorophyll *a*, phytoplankton, colored dissolved organic matter, non-algal particulate, remote sensing, MODIS, VIIRS, Black Sea

**Acknowledgments:** The investigation was carried out within the framework of the state task on theme No. AAAA-A19-119061190081-9 and at the RFBR financial support of project No. 18-45-920070. The authors are very thankful to the junior researcher Sakhon E. G. and the leading engineer Zemlianskaia E. A. (IBSS, Sevastopol) for their assistance in sampling during regular bio-optical monitoring in the Sevastopol Bay. The authors are grateful to Goddard Space Flight Center and Ocean Biology Processing Group (NASA) for the data provided and their preliminary processing.

**For citation:** Skorokhod, E. Yu., Churilova, T. Ya., Efimova, T. V., Moiseeva, N. A. and Suslin, V. V., 2021. Bio-Optical Characteristics of the Black Sea Coastal Waters near Sevastopol: Assessment of MODIS and VIIRS Products Accuracy. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(2), pp. 215-227. doi:10.22449/1573-160X-2021-2-215-227

## Введение

Дистанционное зондирование активно используется для решения различных научных задач, в том числе оперативного мониторинга состояния водных экосистем. Большими преимуществами дистанционного зондирования являются возможность проведения долговременных серий наблюдений с большим пространственным покрытием.

В водных экосистемах отдельного внимания заслуживают прибрежные воды, так как они находятся под сильным антропогенным воздействием. С речным/береговым стоком в прибрежные воды поступает взвешенное и окрашенное растворенное органическое вещество вместе с биогенными элементами, что приводит к увеличению биомассы фитопланктона в прибрежных водах [1]. Фитопланктон, неживое взвешенное вещество и окрашенное растворенное органическое вещество являются оптически активными компонентами среды (ОАК). Содержание ОАК в воде и их спектральные оптические свойства (поглощение и рассеяние света) [2–4] обуславливают восходящее из водной толщи излучение, которое регистрируется спутниковыми инструментами [5]. Вариабельность вклада ОАК в общее поглощение света является одной из причин неточности моделирования спутниковых продуктов при использовании стандартных алгоритмов.

Концентрация хлорофилла  $a$  ( $C_{a-c}$ ) является одним из стандартных спутниковых продуктов, характеризующих продуктивность вод. Для использования спутниковых продуктов необходимо убедиться, что они корректно характеризуют состояние исследуемой акватории. В настоящее время не известны работы, в которых были бы представлены результаты сравнения спутниковых продуктов *MODIS* и *VIIRS* с близкими в пространстве и во времени данными измерений *in situ* в прибрежных водах Черного моря в разные сезоны года.

Многолетний массив данных регулярного биооптического мониторинга, осуществляемого в прибрежных водах Черного моря в районе бухты Севастопольской начиная с 2009 г., представляет собой уникальную базу для валидации спутниковых данных.

Цель работы состоит в оценке точности восстановленных спутниковых продуктов стандартными алгоритмами по результатам спектральных измерений спектрорадиометрами *MODIS*, установленными на искусственных спутниках Земли *Aqua (MA)*<sup>1</sup> и *Terra (MT)*<sup>2</sup>, и *VIIRS*<sup>3</sup> на *Suomi NPP (V)*. С этой целью выполнено сравнение концентрации хлорофилла  $a$  и показателей поглощения света ОАК, рассчитанных по спутниковым и по натурным данным в прибрежных водах Севастополя в отдельные сезоны.

Предварительные результаты были представлены на всероссийской научной конференции [6].

### Материал и методы

**Данные *in situ*.** В рамках регулярного биооптического мониторинга отобраны пробы в поверхностном слое Черного моря на станции, расположенной напротив бухты Севастопольской на расстоянии двух миль от берега в точке с координатами 44° 37' 26" с. ш. и 33° 26' 05" в. д. Глубина на станции составляет ~ 62 м.

Для определения концентрации хлорофилла  $a$  ( $C_{a-i}$ ) использовали спектрофотометрический метод [7]. Показатели поглощения света взвешенным веществом

---

<sup>1</sup> URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/aqua/> (дата обращения: 21.10.2020).

<sup>2</sup> URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/terra/> (дата обращения: 21.10.2020).

<sup>3</sup> URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/viirs-snpp/> (дата обращения: 21.10.2020).

( $a_{p-i}(\lambda)$ ) и окрашенным растворенным органическим веществом ( $a_{CDOM-i}(\lambda)$ ) измеряли в соответствии с протоколом NASA [8, 9]. Пробы морской воды осаждали на стекловолоконных фильтрах типа *GF/F* (*Whatman*) диаметром 25 мм с порами 0,7 мкм при слабом вакууме (не более 0,2 атм). Для получения пробы окрашенного растворенного органического вещества морскую воду пропускали через мембранные фильтры диаметром 47 мм с порами 0,2 мкм.

Спектрофотометрические измерения проводились сразу после отбора проб на двухлучевых спектрофотометрах: *SPECORD M40* (*Carl Zeiss Jena*) в 2009–2014 гг. и *LAMBDA 35* (*PerkinElmer*) с интегрирующей сферой в 2015–2019 гг.

Поглощение света взвешенным веществом ( $a_{p-i}(\lambda)$ ) разделяли на поглощение света пигментами фитопланктона ( $a_{ph-i}(\lambda)$ ) и поглощение света неживой взвесью ( $a_{NAP-i}(\lambda)$ ) путем обесцвечивания пигментов взвеси на фильтре в соответствии с методами [10, 11].

**Спутниковые данные.** Использовались данные 2-го уровня <sup>4</sup> с пространственным разрешением 1 км.

При анализе были использованы следующие спутниковые продукты:

– концентрация хлорофилла  $a$  ( $C_{a-c}$ ),  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , рассчитанная на основе двух стандартных алгоритмов NASA: *Ocean chlorophyll algorithm (OCx)* [12] и *Hu color index (CI)* [13];

– показатель поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 443 нм ( $a_{ph-c}(443)$ ),  $\text{м}^{-1}$ , рассчитанный по модели *NASA Generalized Inherent Optical Property (GIOP)* [14, 15];

– показатель поглощения света  $a_{CDOM-c}(\lambda)$  в сумме с  $a_{NAP-c}(\lambda)$  на длине волны 443 нм, ( $a_{CDM-c}(443)$ ),  $\text{м}^{-1}$ , рассчитанный по модели *NASA GIOP*.

Обработка спутниковых данных проводилась при помощи программного обеспечения *SeaDAS 7.5.3*, разработанного NASA <sup>5</sup>. Спутниковые данные выбирали из области вокруг станции. Область имеет форму квадрата с центром в точке с координатами ( $44^\circ 37' 26'' \pm 0^\circ 00' 32''$ ) с. ш. и ( $33^\circ 26' 05'' \pm 0^\circ 00' 54''$ ) в. д.

При выборе спутниковых данных предпочтение отдавали более географически близким к точке натуральных измерений. При отсутствии спутниковых данных в выбранной области стандартные продукты получали путем аппроксимации значений соседних пикселей (минимум два прилегающих пикселя с противоположных сторон).

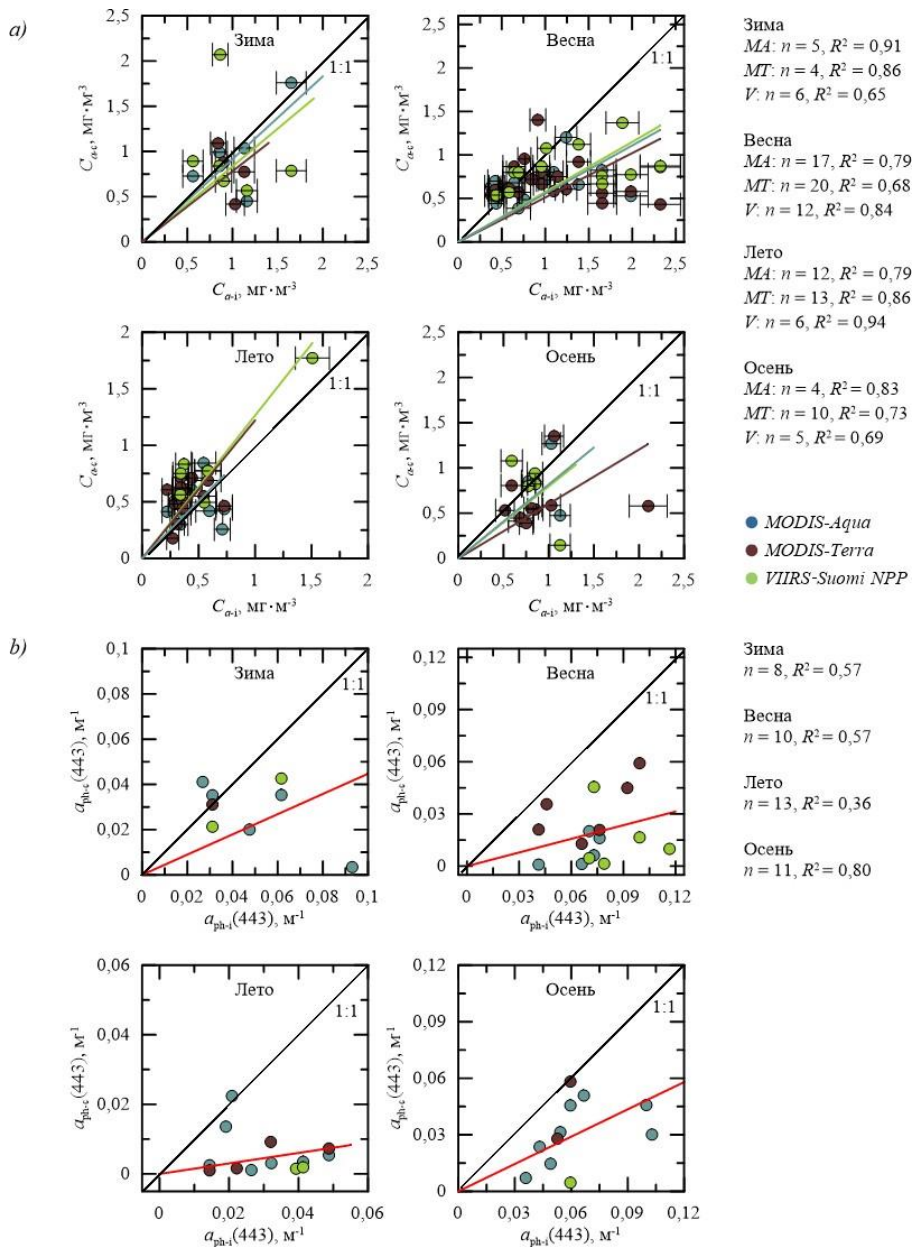
## Результаты и обсуждение

Сравнение спутниковых продуктов с данными измерений *in situ* проводили в течение всего годового цикла развития фитопланктона. С этой целью был создан массив данных, содержащий результаты натуральных и спутниковых измерений.

**Концентрация хлорофилла  $a$  ( $C_a$ ).** Ошибка расчета  $C_{a-c}$  в зимний период в среднем составила  $\pm 38\%$ . Отклонения от результатов натуральных измерений наблюдались как в сторону более высоких, так и в сторону более низких значений (рис. 1, *a*).

<sup>4</sup> URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/format/12nc/> (дата обращения: 21.10.2020).

<sup>5</sup> URL: <https://seadas.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 21.10.2020).



**Р и с. 1.** Сравнение спутниковых продуктов  $C_{a-s}$  (a) и  $a_{ph-s}(443)$  (b) с результатами натурных биооптических измерений ( $C_{a-i}$  и  $a_{ph-i}(443)$ ). Цветные линии – линии линейных регрессий; красная линия – линейная регрессия для всех спектро радиометров

**F i g. 1.** Comparison of the satellite-derived products  $C_{a-s}$  (a) and  $a_{ph-s}(443)$  (b) with the results of field bio-optical measurements ( $C_{a-i}$  and  $a_{ph-i}(443)$ ). Color lines are the linear regression lines; red line is the linear regression for all the spectroradiometers

Существенное отклонение значений  $C_{a-c}$  от результатов натурных измерений  $C_{a-i}$  отмечено в весенний период. Явно выражен характер ошибки: при высоких значениях  $C_{a-i}$  ( $C_{a-i} > 1,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ )  $C_{a-c}$  была ниже  $C_{a-i}$  в 1,0–5,4 раза. Погрешность определения  $C_{a-c}$  весной в среднем составила  $\pm 35 \%$ .

Летом характер ошибки менялся: преимущественно наблюдалось превышение значений  $C_{a-c}$  по сравнению с  $C_{a-i}$  в 0,36–2,7 раза, в среднем в 1,4 раза. Значения  $C_a$  небольшие, но ошибка расчета  $C_{a-c}$  была весьма существенной – в среднем составила  $\pm 55 \%$ .

Осенью, так же как и весной,  $C_{a-c} < C_{a-i}$  (при  $C_{a-i} > 1,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ ), преимущественно по данным *MT*. Ошибка определения  $C_{a-c}$  по данным всех спектро радиометров в тот сезон в среднем составила  $\pm 36 \%$ .

То есть на протяжении всего года спутниковый продукт  $C_{a-c}$  определяется с большой относительной ошибкой (в среднем  $\pm 41 \%$ ) по данным всех спектро радиометров, однако все же можно выделить *V* (ошибка в среднем  $\pm 43 \%$  при выборке в 29 значений) как самый неточный из рассматриваемых спектро радиометров и *MA* как наилучший (ошибка в среднем  $\pm 38 \%$  при выборке в 38 значений).

Спутниковый продукт  $C_{a-c}$  генерируется двумя алгоритмами: *CI* и *OCx*. При  $C_{a-c}$  ниже  $0,15 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  используется алгоритм *CI*, при  $C_{a-c}$  выше  $0,20 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  – алгоритм *OCx*. При значениях  $C_{a-c}$  в диапазоне от  $0,15$  до  $0,20 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  алгоритмы *CI* и *OCx* сочетаются при помощи взвешенного подхода. Входными данными при генерации  $C_{a-c}$  алгоритмами *CI* и *OCx* являются значения спектрального коэффициента яркости  $R_{rs}(\lambda)$ . Кроме  $R_{rs}(\lambda)$ , алгоритм *OCx* включает в себя постоянные табличные коэффициенты  $a_i$ .

Использование одних и тех же коэффициентов без учета типа вод может являться одной из причин возникновения ошибки в определении  $C_{a-c}$  на региональном уровне.

**Показатель поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 443 нм ( $a_{ph}(443)$ ).** Значения этого параметра, полученные по данным спектро радиометров ( $a_{ph-c}(443)$ ), на протяжении года почти всегда ниже результатов наблюдений *in situ* ( $a_{ph-i}(443)$ ). Диапазоны изменения  $a_{ph-c}(443)$  в среднем в два раза уже диапазона изменения  $a_{ph-i}(443)$  (рис. 1, *b*). Таким образом, поглощение света пигментами фитопланктона в прибрежных водах Черного моря, сгенерированное стандартными алгоритмами по спутниковым данным, существенно недооценивается.

**Связь между  $C_a$  и  $a_{ph}(443)$ .** Ранее для большого массива океанических данных была установлена зависимость между  $C_a$  и  $a_{ph}(\lambda)$ , которая описывается степенной функцией [16, 17]. Коэффициенты этой степенной зависимости различны как для разных акваторий [18, 19], так и для одной акватории в разные сезоны [20, 21].

Связь между  $C_a$  и  $a_{ph}(\lambda)$  позволяет достаточно точно восстанавливать  $C_a$  по показателю поглощения света с учетом сезонных особенностей влияния условий среды обитания фитопланктона на содержание пигментов и светопоглощающую способность клеток. Этот подход, особенность которого состоит в оценке  $C_a$  на основе  $a_{ph}(\lambda)$ , используется в активно развивающемся в настоящее время трехканальном алгоритме [22].

Если  $C_a$  и  $a_{ph}(\lambda)$  определены верно, то должна прослеживаться их взаимосвязь. На рис. 2 видно, что степенная зависимость между данными натурных

наблюдений ( $a_{\text{ph-i}}(443)$  и  $C_{a-i}$ ) отмечается во все сезоны, тогда как связь между спутниковыми продуктами ( $a_{\text{ph-c}}(443)$  и  $C_{a-c}$ ) почти отсутствует, что свидетельствует о некорректности оценок этих параметров по стандартным алгоритмам NASA.

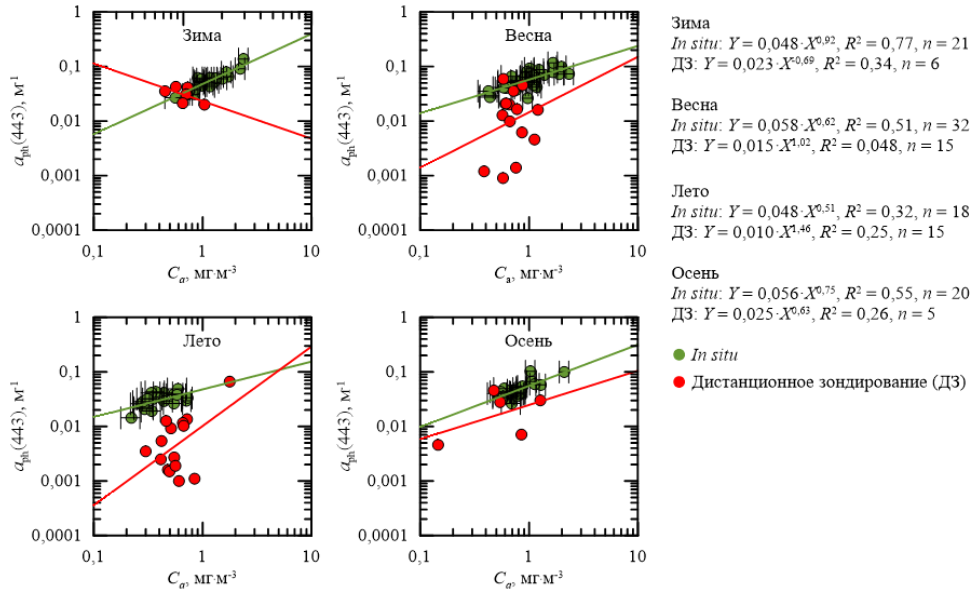


Рис. 2. Связь между  $a_{\text{ph}}(443)$  и  $C_a$ . Цветные линии – линии тренда  
 Fig. 2. Relation between  $a_{\text{ph}}(443)$  and  $C_a$ . Color lines denote the regression lines

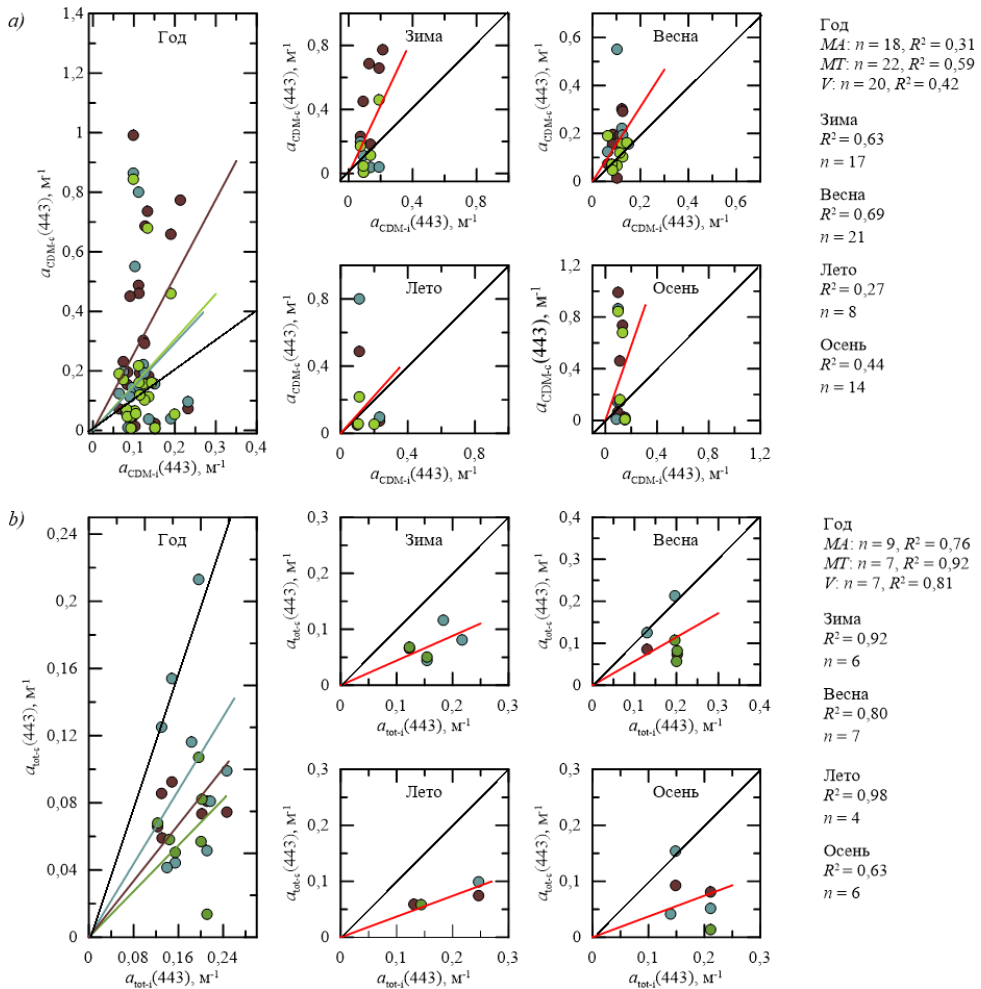
**Показатель поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом в сумме с показателем поглощения света неживой взвесью на длине волны 443 нм ( $a_{\text{CDM-c}}(443)$ ).** Диапазон изменчивости  $a_{\text{CDM-c}}(443)$  (от 0,010 до 1,02  $\text{m}^{-1}$ ) на протяжении года в пять раз превышает диапазон изменчивости  $a_{\text{CDM-i}}(443)$  (от 0,060 до 0,23  $\text{m}^{-1}$ ) (рис. 3, а). Погрешность определения  $a_{\text{CDM-c}}(443)$  в среднем за год составила  $\pm 160\%$ . При этом наименьшие ошибки наблюдались весной: средняя относительная погрешность определения  $a_{\text{CDM-c}}(443)$  составила  $\pm 82\%$ .

Спутниковые продукты, восстановленные по данным квазисинхронных измерений разными спектро радиометрами, различались, но в целом точность определения спутниковых продуктов на протяжении года была сопоставимой: относительная ошибка  $\delta(C_{a-c})$  составила  $\pm 38$ ,  $\pm 41$ ,  $\pm 43\%$  для МА, МТ, V соответственно, а  $\delta(a_{\text{ph-c}}(443))$   $\pm 64$ ,  $\pm 54$ ,  $\pm 75\%$ , за исключением  $\delta(a_{\text{CDM-c}}(443))$ , равной  $\pm 158$ ,  $\pm 207$ ,  $\pm 117\%$ .

**Показатель поглощения света всеми ОАК на длине волны 443 нм ( $a_{\text{tot}}(443)$ ).** Ошибка определения  $C_{a-c}$ ,  $a_{\text{ph-c}}(443)$  и  $a_{\text{CDM-c}}(443)$ , возможно, является следствием некорректного разделения общего поглощения света взвешенным и окрашенным растворенным органическим веществом на  $a_{\text{ph-c}}(443)$  и  $a_{\text{CDM-c}}(443)$ .

Для проверки данной гипотезы проведено сравнение значений  $a_{\text{tot}}(443)$  по данным спектрорадиометров и измерений *in situ*. Поглощение света чистой водой на длине волны 443 нм ( $a_w(443)$ ) не учитывали, так как оно постоянно.

На протяжении года разница между максимальным и минимальным значениями по спутниковым данным ( $0,014\text{--}0,21 \text{ м}^{-1}$ ) и по данным измерений *in situ* ( $0,051\text{--}0,25 \text{ м}^{-1}$ ) была одинаковой и составила  $0,20 \text{ м}^{-1}$ , при этом диапазон спутниковых значений был несколько смещен (на  $0,037 \text{ м}^{-1}$ ) относительно данных *in situ* в сторону меньших величин (рис. 3, b).



**Р и с. 3.** Сравнение значений  $a_{\text{CDM-c}}(443)$  (а),  $a_{\text{tot-c}}(443)$  (б) с результатами натуральных измерений ( $a_{\text{CDM-i}}(443)$  и  $a_{\text{tot-i}}(443)$ ). Обозначения см. на рис. 1

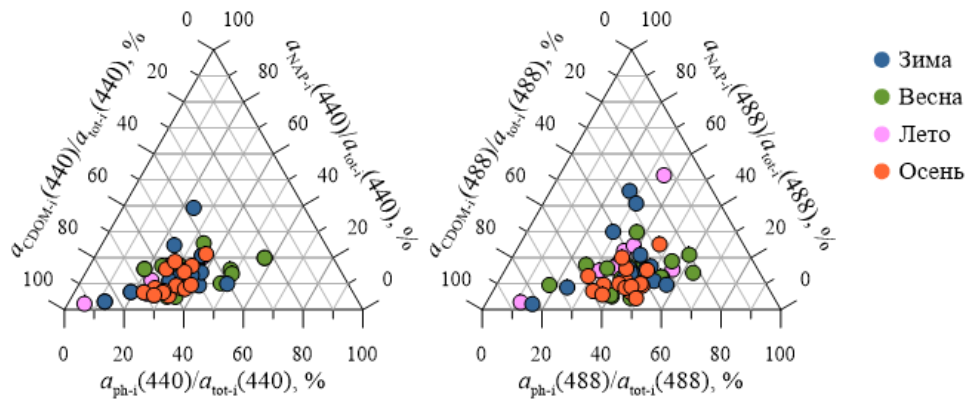
**F i g. 3.** Comparison of the  $a_{\text{CDM-s}}(443)$  (a) and  $a_{\text{tot-s}}(443)$  (b) values with the results of field measurements ( $a_{\text{CDM-i}}(443)$  and  $a_{\text{tot-i}}(443)$ ). Designations as in Fig. 1

Однако следует отметить, что сравнение данных в парах квазисинхронных измерений показало, что  $a_{\text{tot-c}}(443)$  ниже  $a_{\text{tot-i}}(443)$  в  $0,92\text{--}4,1$  раза. В одном случае было установлено существенное отличие спутниковых (У) данных ( $a_{\text{tot-c}}(443) = 0,014 \text{ м}^{-1}$ ) от результатов наблюдений *in situ* ( $a_{\text{tot-i}}(443) = 0,21 \text{ м}^{-1}$ ). Сравнение всех пар



данных выявило, что значения  $a_{\text{tot-c}}(443)$  и  $a_{\text{tot-i}}(443)$  не совпадают. При этом значения  $a_{\text{tot-c}}(443)$  по данным разных спектро радиометров, полученным в течение одних суток, существенно различаются (в 0,57–7,2 раза) между собой. Из этого следует, что проблема заключается не в точности разделения  $a_{\text{tot-c}}(\lambda)$  на показатели поглощения света ОАК (пигментами фитопланктона и окрашенным растворенным органическим веществом в сумме с неживой взвесью), а в его изначально неточном определении. Сравнение показало, что оценка  $a_{\text{tot-c}}(443)$  ниже  $a_{\text{tot-i}}(443)$  в большинстве случаев (в 0,92–15 раз, в среднем в 2,9 раза).

**Вклад ОАК в общее поглощение света по данным измерений *in situ* ( $a_{\text{tot-i}}(\lambda)$ ).** Относительный вклад отдельных ОАК в общее поглощение света меняется в зависимости от длины волны, времени года и характеризует оптический тип вод [23–26]. Вклад ОАК в общее поглощение света ( $a_{\text{tot-i}}(\lambda)$ ) на длинах волн 440 и 488 нм в отдельные сезоны в поверхностном слое моря представлен на рис. 4.



**Рис. 4.** Вклад пигментов фитопланктона ( $a_{\text{ph-i}}(\lambda)/a_{\text{tot-i}}(\lambda)$ ), окрашенного растворенного органического вещества ( $a_{\text{CDOM-i}}(\lambda)/a_{\text{tot-i}}(\lambda)$ ) и неживого взвешенного вещества ( $a_{\text{NAP-i}}(\lambda)/a_{\text{tot-i}}(\lambda)$ ) в общее поглощение света ( $a_{\text{tot-i}}(\lambda)$ ) на длинах волн 440 и 488 нм

**Fig. 4.** Contribution of the phytoplankton pigments ( $a_{\text{ph-i}}(\lambda)/a_{\text{tot-i}}(\lambda)$ ), the colored dissolved organic matter ( $a_{\text{CDOM-i}}(\lambda)/a_{\text{tot-i}}(\lambda)$ ), and the non-algal particulate ( $a_{\text{NAP-i}}(\lambda)/a_{\text{tot-i}}(\lambda)$ ) to the light absorption budget ( $a_{\text{tot-i}}(\lambda)$ ) at 440 nm and 488 nm

Для исследованных длин волн получено, что поглощение света окрашенным растворенным органическим веществом превалирует над поглощением света пигментами фитопланктона и поглощением света взвешенным веществом во все сезоны. На протяжении года наибольший вклад окрашенного растворенного органического вещества отмечен в осенний период. В среднем его значение составляло 59 и 47 % на длинах волн 440 и 488 нм соответственно. На длине волны 488 нм вклад пигментов фитопланктона в общее поглощение возрастает в сравнении с данными, полученными на длине волны 440 нм. Анализ сезонной динамики показал, что наибольший вклад пигментов фитопланктона в общее поглощение приходится на весну и в среднем составляет 35 и 44 % на длинах волн 440 и 488 нм соответственно. Отмеченная сезонная динамика значений показателей поглощения света отдельных ОАК среды, а так-

же их относительного вклада в общее поглощение света на длинах волн в диапазоне излучения, в котором яркость моря наиболее чувствительна к оптическим свойствам среды, вероятно, является причиной грубых ошибок при оценке ОАК с помощью стандартных алгоритмов.

Исследование показало, что рассмотренные спутниковые продукты некорректно соотносятся с биооптическими показателями вод исследуемой акватории, а также с их пропорциями (таблица). Сезонный ход концентрации хлорофилла *a* сглаживается: значения  $C_{a-c}$  изменяются от 0,18–1,8 мг·м<sup>-3</sup> летом до 0,39–1,4 мг·м<sup>-3</sup> весной в отличие от отмеченного в природе увеличения  $C_{a-i}$  от минимальных значений (0,22–1,5 мг·м<sup>-3</sup>) летом до максимальных (0,38–2,3 мг·м<sup>-3</sup>) весной. Ошибка  $C_{a-c}$  в зависимости от сезона варьировалась от ±34 до ±55 %, при этом она не являлась однотипной: в весенний период значения  $C_{a-c}$  в среднем были ниже  $C_{a-i}$  в 1,6 раза, а в летний – выше в 1,4 раза.

**Отношение поглощения света пигментами фитопланктона к поглощению окрашенным растворенным органическим веществом в сумме с неживой взвесью ( $a_{ph(443)}/a_{CDM(443)}$ )**  
**Ratio of light absorption by the phytoplankton pigments to absorption by the colored dissolved organic matter in total with non-algal particles ( $a_{ph(443)}/a_{CDM(443)}$ )**

Значение / Value	<i>in situ</i>	MA	MT	V
Зима / Winter				
Min	12/88	3,0/97	-	31/69
Max	51/49	80/20	-	84/16
Mean	32/68	38/62	50/50*	58/42
Весна / Spring				
Min	20/80	1,0/99	7,0/93	2/98
Max	58/42	15/85	81/19	60/40
Mean	38/62	9,0/91	36/64	21/79
Лето / Summer				
Min	6,0/94	1/99	0,40/100	3,0/97
Max	37/63	14/86	16/84	55/45
Mean	26/71	7,0/93	8,0/92	18/82
Осень / Autumn				
Min	24/76	5,0/95	30/70	-
Max	39/61	88/12	88/12	-
Mean	33/67	45/55	51/49	34/66*

\* Одна пара данных / One data pair.

Неточность определения концентрации хлорофилла *a* ведет к ошибкам в определении многих других показателей, расчеты которых базируются на этом параметре. В частности, это приводит к некорректной оценке биомассы фитопланктона, первичной продукции и скорости роста планктонных микроводорослей [27, 28]. Значения  $a_{CDM-c(443)}$  выше значений  $a_{CDM-i(443)}$  (в среднем в 2,2 раза), а  $a_{ph-c(443)}$  ниже  $a_{ph-i(443)}$  (в среднем в 9 раз) на протяжении всего года, что ведет к некорректному результату расчета относительного вклада фитопланктона и неживых компонентов оптически активных веществ в среде

(*CDOM* и *NAP*), а следовательно, и к ошибке определения оптических свойств вод, в частности прозрачности, спектральных свойств квантовой облученности, проникающей в водную толщу [4, 24, 29] и фотосинтетического потенциала микроводорослей [30–32].

Результаты исследования свидетельствуют о том, что применяемые стандартные алгоритмы, основанные на биооптических показателях вод 1-го типа [33], не подходят для расчета спутниковых продуктов для прибрежных вод Черного моря (в частности, в районе бухты Севастопольской).

Чтобы использовать данные дистанционного зондирования, требуется развивать региональные алгоритмы, учитывающие сезонные особенности спектральных биооптических показателей вод и их соотношение с концентрацией основного фотосинтетически активного пигмента – хлорофилла *a* в исследуемом регионе. В частности, можно адаптировать трехканальный алгоритм [22], который разделяет общее поглощение света на поглощение растворенным окрашенным органическим веществом в сумме с неживой взвесью и пигментами фитопланктона. В расчете по этому алгоритму используются коэффициенты яркости моря в диапазоне длин волн 480–560 нм. По этим коэффициентам восстанавливается концентрация хлорофилла *a* с учетом связи между показателями поглощения света пигментами и концентрации хлорофилла *a* [20, 34].

### Заключение

На основе сформированного многолетнего массива натуральных биооптических данных проведена оценка точности спутниковых продуктов, рассчитанных по данным спектрорадиометров *MA*, *MT* и *V*. Получены следующие результаты:

1. В среднем относительная ошибка стандартного спутникового продукта «концентрация хлорофилла *a*» в зависимости от сезона составила от  $\pm 34$  до  $\pm 55$  %, при этом ошибка не являлась однотипной: в весенний период значения  $C_{a-c}$  в среднем были ниже  $C_{a-i}$  в 1,6 раза, а в летний – выше в 1,4 раза.

2. В процессе исследования выявлено, что при расчете спутниковых продуктов с применением стандартных алгоритмов *NASA* вклад пигментов фитопланктона в общее поглощение света остается недооцененным: в среднем значения показателя поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 443 нм ( $a_{ph-c}(443)$ ) были в девять раз ниже результатов натуральных измерений. В это же время показатель поглощения света растворенным окрашенным органическим веществом в сумме с показателем поглощения света неживой взвесью на длине волны 443 нм ( $a_{CDM-c}(443)$ ) в среднем был переоценен в 2,2 раза.

3. Существенные погрешности в расчете спутниковых продуктов и разница между показателями поглощения света всеми ОАК воды ( $a_{tot}(\lambda)$ ) ставят под сомнение применимость стандартных алгоритмов для исследуемого района моря.

4. Распределение вклада ОАК в общее поглощение света меняется на протяжении года: наибольший вклад *CDOM* на длинах волн 443 и 488 нм (59 и 47 %) приходится на осень, а наибольший вклад  $a_{ph-i}(\lambda)$  (35 и 43 %) – на весну.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. State of the Environment of the Black Sea (2001 – 2006/7) / Т. Oguz (ed.). Istanbul, Turkey, 2008. 448 p. (Publications of the Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution (BSC) ; 2008-3).
2. Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and in situ data / O. V. Kopelevich [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2002. Vol. 36, iss. 3–4. P. 145–160. doi:10.1016/S0924-7963(02)00184-7
3. *Ерлов Н. Г.* Оптика моря. Л. : Гидрометиздат, 1980. 248 с.
4. *Kirk J. T. O.* Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3<sup>d</sup> edition. Cambridge : Cambridge University Press, 2011. 662 p.
5. *Gordon H. R., Wang M.* Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, iss. 3. P. 443–452. doi:10.1364/ao.33.000443
6. Сравнение стандартных продуктов со спектрометрических *MODIS Aqua/Terra* и *VIIRS* с результатами биооптических измерений в прибрежных водах Севастополя / Е. Ю. Скороход [и др.] // Понт Эвксинский – 2019 : материалы XI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых по проблемам водных экосистем, посвященной памяти д. б. н., проф. С. Б. Гулина, г. Севастополь, 23–27 сентября 2019 г. Севастополь, 2019. С. 134–135.
7. *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 der Pflanzen*. 1975. Vol. 167, iss. 2. P. 191–194.
8. *Roesler C. S.* In Situ Bio-Optical Observations on NERACOOS Buoy A01 (2005–2017): multichannel calibrated chlorophyll fluorescence, turbidity, and multispectral incident irradiance and upwelling radiance. Boston : Massachusetts Water Resources Authority, 2018. 19 p.
9. *Twardowski M., Röttgers R., Stramski D.* The absorption Coefficient, An Overview // IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation. Dartmouth, NS, Canada, 2018. Vol. 1.0 : Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient. Chapter 1. P. 1–17. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-119>
10. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea / M. Kishino [et al.] // *Bulletin of Marine Science*. 1985. Vol. 37, no. 2. P. 634–642.
11. *Tassan S., Ferrari G. M.* An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters // *Limnology and Oceanography*. 1995. Vol. 40, iss. 8. P. 1358–1368. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1358>
12. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS / J. E. O'Reilly [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. Vol. 103, iss. C11. P. 24937–24953. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>
13. *Hu C., Lee Z., Franz B.* Chlorophyll *a* algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on the three-band reflectance difference // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2012. Vol. 117, iss. C1. C01011. doi:10.1029/2011JC007395
14. Retrieving marine inherent optical properties from satellites using temperature and salinity-dependent backscattering by seawater / P. J. Werdell [et al.] // *Optics Express*. 2013. Vol. 21, iss. 26. P. 32611–32622. doi:10.1364/OE.21.032611
15. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties / P. J. Werdell [et al.] // *Applied Optics*. 2013. Vol. 52, iss. 10. P. 2019–2037. <http://doi.org/10.1364/ao.52.002019>
16. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization / A. Bricaud [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1995. Vol. 100, iss. C7. P. 13321–13332. doi:10.1029/95JC00463

17. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll *a* concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models / A. Bricaud [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. Vol. 103, iss. C13. P. 31033–31044.
18. *Cleveland J. S.* Regional models for phytoplankton absorption as a function of chlorophyll *a* concentration // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1995. Vol. 100, iss. C7. P. 13333–13344. <https://doi.org/10.1029/95JC00532>
19. Light absorption properties of southeastern Bering Sea waters: Analysis, parameterization and implications for remote sensing / P. Naik [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 134. P. 120–134. doi:10.1016/j.rse.2013.03.004
20. Light Absorption by Phytoplankton in the Upper Mixed Layer of the Black Sea: Seasonality and Parametrization / T. Churilova [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2017. Vol. 4. 90. doi:10.3389/fmars.2017.00090
21. Dynamics in pigment concentration and light absorption by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Black Sea coastal waters (near Sevastopol) / T. Efimova [et al.] // *Proceedings of SPIE*. 2018. Vol. 10833 : 24<sup>th</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 108336C. doi:10.1117/12.2504657
22. *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. P. 4380–4400. doi:10.1080/01431161.2016.1211350
23. Phytoplankton absorption predicts patterns in primary productivity in Australian coastal shelf waters / C. M. Robinson [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2017. Vol. 192. P. 1–16. doi:10.1016/j.ecss.2017.04.12
24. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in the Crimean coastal waters (the Black Sea) / T. Churilova [et al.] // *Proceedings of SPIE*. 2017. Vol. 10466 : 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 104664B. doi:10.1117/12.2288339
25. Optical characteristics of two contrasting Case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms / M. Darecki [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2003. Vol. 23, iss. 3–4. P. 237–250. doi:10.1016/s0278-4343(02)00222-4
26. Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters / A. Bricaud [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol. 115, iss. C8. C08009. doi:10.1029/2009JC005517
27. Comparison of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature, and irradiance / J. Campbell [et al.] // *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. Vol. 16, iss. 3. P. 9-1–9-15. doi:10.1029/2001GB001444
28. Реанализ долговременных рядов изменения биомассы фитопланктона в открытой части Черного моря по результатам натурных и спутниковых наблюдений / О. В. Кривенко [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : МГИ, 2012. Вып. 26, т. 2. С. 185–194.
29. The Effect of Optical Properties on Secchi Depth and Implications for Eutrophication Management / E. T. Harvey [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2019. Vol. 5. 496. doi:10.3389/fmars.2018.00496
30. *Markager S., Vincent W. F.* Light absorption by phytoplankton: development of a matching parameter for algal photosynthesis under different spectral regimes // *Journal of Plankton Research*. 2001. Vol. 23, iss. 12. P. 1373–1384. <https://doi.org/10.1093/plankt/23.12.1373>
31. *Bracher A. U., Tilzer M. M.* Underwater light field and phytoplankton absorbance in different surface water masses of the Atlantic sector of the Southern Ocean // *Polar Biology*. 2001. Vol. 24, iss. 9. P. 687–696. <https://doi.org/10.1007/s003000100269>

32. «Цветение» фитопланктона и фотосинтетически активная радиация в прибрежных водах / Т. Я. Чурилова [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86, № 6. С. 976–985.
33. *Morel A., Prieur L.* Analysis of variations in ocean color // *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22, iss. 4. P. 709–722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
34. Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea / Т. Churilova [et al.] // *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 52, iss. sup. 1. P. 123–136. doi:10.1080/22797254.2018.1533389

*Об авторах:*

**Скорород Елена Юрьевна**, младший научный сотрудник, Научно-исследовательский центр геоматики, ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 3314-5775, ORCID ID: 0000-0002-3057-3964**, [elenaskorokhod@ibss-ras](mailto:elenaskorokhod@ibss-ras)

**Чурилова Татьяна Яковлевна**, кандидат биологических наук, руководитель Научно-исследовательского центра геоматики, ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 2238-9533, ORCID ID: 0000-0002-0045-7284**, [tanya.churilova@ibss-ras.ru](mailto:tanya.churilova@ibss-ras.ru)

**Ефимова Татьяна Владимировна**, младший научный сотрудник, Научно-исследовательский центр геоматики, ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 1668-0742, ORCID ID: 0000-0003-3908-4160**, [tefimova@ibss-ras.ru](mailto:tefimova@ibss-ras.ru)

**Моисеева Наталия Александровна**, младший научный сотрудник, Научно-исследовательский центр геоматики, ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 8946-3315, ORCID ID: 0000-0003-1356-7981**, [nataliya-moiseeva@yandex.ru](mailto:nataliya-moiseeva@yandex.ru)

**Суслин Вячеслав Владимирович**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель отдела динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 1681-7926, ORCID ID: 0000-0002-8627-7603**, [slava.suslin@mhi-ras.ru](mailto:slava.suslin@mhi-ras.ru)