

Регионально адаптированный алгоритм восстановления концентрации хлорофилла *a* для Чёрного моря, анализ причин отличия спутниковых и контактных данных

Р. Р. Станичная¹, С. В. Станичный¹, Е. Г. Арашкевич²

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*
E-mails: rrsta@mail.ru, sstanichny@mail.ru

² *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: aelena@ocean.ru

В работе предложен регрессионный метод коррекции стандартных данных по концентрации хлорофилла *a* спутникового сенсора MODIS-Aqua для Чёрного моря. Регрессионные коэффициенты получены в результате сопоставления спутниковых и контактных измерений для северо-восточной части Чёрного моря за 2006–2017 гг. Рассмотрены две формулы для коррекции спутниковых данных: линейная и логарифмическая. Полученная ошибка оценки в обоих случаях составила 0,1 мг/м³ в диапазоне концентрации до 1 мг/м³. Рассмотрены причины возможного различия спутниковых и контактных измерений, связанные с пространственной неоднородностью концентрации хлорофилла *a* на масштабах порядка 1 км (области осреднения спутникового сенсора), несинхронностью измерений, приводящей к смещению пространственных структур при наличии течений, а также с возможным изменением концентрации хлорофилла *a* с глубиной в зоне формирования сигнала оптических радиометров (~0–10 м).

Ключевые слова: хлорофилл, дистанционное зондирование, контактные данные, региональный алгоритм, Чёрное море

Одобрена к печати: 10.07.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-29-37

Введение

Измеряемая на основе данных оптических спутниковых сенсоров концентрация хлорофилла *a* (Chl-*a*) является важным параметром, характеризующим состояние морских экосистем. Алгоритмы восстановления концентрации Chl-*a* на основе спутниковых измерений яркости восходящего излучения базируются на особенностях спектрального хода коэффициента поглощения хлорофилла *a* и используют, как правило, отношения (индексы Rrs) коэффициентов яркости морской поверхности в зелёной (530–555 нм) области спектра, где поглощение Chl-*a* минимально, и сине-жёлтой (440–490 нм), где находится полоса поглощения Chl-*a*. (O'Reilly et al., 2000). В ряде случаев для вод с высоким содержанием Chl-*a* используются индексы в красной и ближней инфракрасной областях (Moses et al., 2009).

Типичный алгоритм расчёта концентрации хлорофилла *a* имеет вид: $\text{Chl-}a = 10^{f(\text{Rrs})}$, где $f(\text{Rrs})$ — некоторая эмпирическая функция от упомянутых выше индексов.

Полное описание стандартного алгоритма ОСЗМ для сканера MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) можно найти на веб-сайте https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/#sec_2.

Однако наличие других «цветных» пигментов в воде может приводить к достаточно большим ошибкам при использовании стандартных алгоритмов, учитывая, что в разных акваториях относительное содержание этих пигментов и Chl-*a* может существенно различаться. Так, для Чёрного моря спутниковые данные о концентрации хлорофилла, как правило, превышают измеренные значения ввиду наличия в воде растворённого органического вещества (Суетин и др., 2002).

Возможные подходы к разработке регионально адаптированных алгоритмов могут развиваться по нескольким направлениям:

1. Простой поиск регрессионной связи стандартных спутниковых значений *Chl-a* и измеренных значений в изучаемом районе и нахождение регрессионной связи для регионального алгоритма (*Chl-a_{рег}*):

$$\text{Chl-a}_{\text{рег}} = F(\text{Chl-a}), \text{ в простейшем случае: } \text{Chl-a}_{\text{рег}} = A \times \text{Chl-a} + B.$$

2. Нахождение оптимальной зависимости для $f(Rrs)$ с использованием имеющихся значений индексов (Kopelevich et al., 2004).

3. Использование нескольких индексов в различных областях спектра для расчёта оптимальных значений *Chl-a_{рег}*, в том числе с использованием нейронных сетей (Morozov et al., 2010; Suslin, Churilova et al., 2016).

С точки зрения потенциального пользователя наиболее удобным является первый метод, когда производится коррекция свободно доступных значений одного параметра — *Chl-a* — из глобальных архивов данных.

Для разработки описанных алгоритмов необходим массив контактных измерений концентрации хлорофилла *a*, синхронных со спутниковыми в изучаемом районе. Целью настоящей работы является нахождение связей между измеренными *in situ* и спутниковыми значениями *Chl-a* и анализ возможных источников несоответствия.

Используемые данные

В исследовании были использованы квазисинхронные со спутниковыми (MODIS-Aqua) данные, полученные *in situ* в северо-восточной части Чёрного моря в экспедициях на полигоне Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук в 2006–2017 гг. (Арашкевич и др., 2015).

Пробы для измерения концентрации *Chl-a* были собраны батометрами Нискина комплекса Rosett SeaBird SBE 55в на глубинах 0 м, 10, 20, 50 и 70 м, а также в слое максимума флуоресценции, определённого предварительным зондированием CTD-зондом (*англ.* Conductivity, Temperature and Depth), оснащённым датчиком флуоресценции.

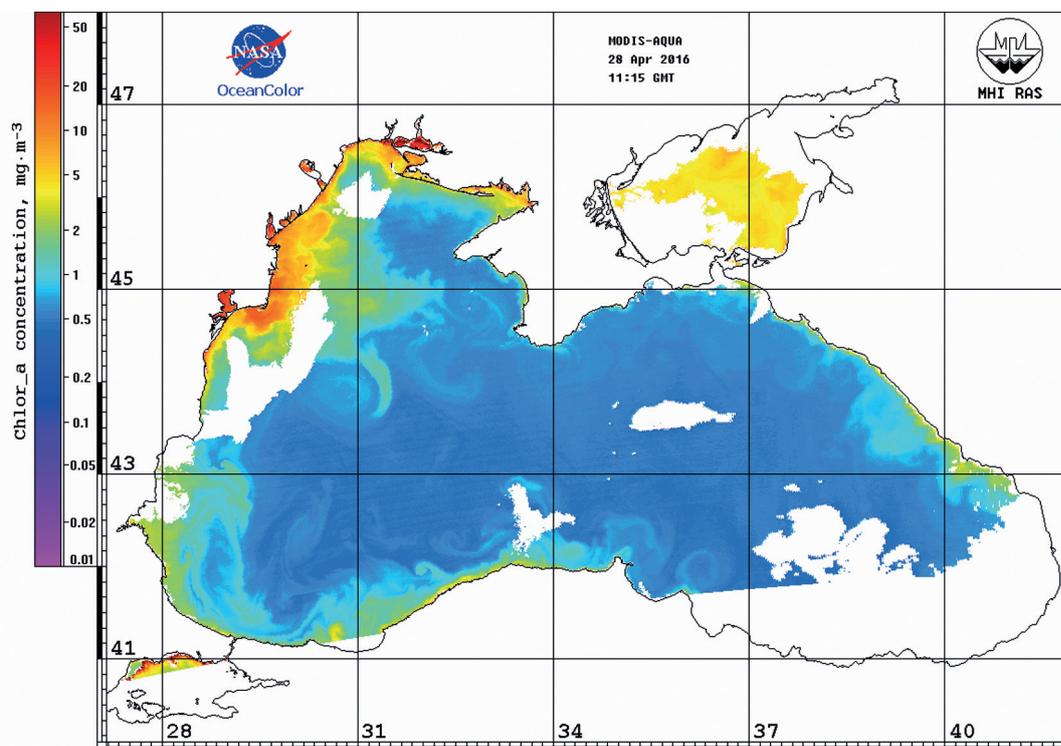


Рис. 1. Карта концентрации хлорофилла *a* за 26 апреля 2016 г., белые участки — облачность

Определение содержания Chl-*a* проводили флюоресцентным методом (Holm-Hansen et al., 1965). Пробы воды объёмом 550–600 мл фильтровали через стекловолокнистые фильтры марки GF/F под вакуумом 0,3 атм. Экстракцию выполняли 90%-м ацетоном при температуре 4 °С в темноте в течение 24 ч. Флюоресценция экстрактов была измерена на флюориметре Trilogy Turner Designs (США) до и после подкисления 1 N раствором хлороводорода (HCl). Флюориметр был откалиброван по спектрофотометрическому методу с использованием химически чистого Chl-*a* (Sigma, product # С 6144) в качестве стандарта. Концентрацию хлорофилла *a* и феофитина *a* рассчитывали по формуле (Holm-Hansen, Riemann, 1978). Контактные данные представляют собой массив, состоящий из 305 измерений *in situ* концентрации Chl-*a* в поверхностном слое. На основе спутниковых данных сканера MODIS-Aqua второго уровня, полученных из архива OceanColor Центра космических полётов НАСА имени Годдарда (англ. NASA's Goddard Space Flight Center — GSFC; НАСА — Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, англ. NASA — National Aeronautics and Space Administration), рассчитывались карты концентрации хлорофилла *a* с пространственным разрешением $\sim 1,1 \times 1,1$ км.

Для каждого из контактных измерений подобран квазисинхронный по времени (интервал не более 10 ч, основной массив — 2–4 ч) снимок сканера MODIS-Aqua, произведена отбраковка изображений с облачностью в районе измерений. Пример такого снимка представлен на *рис. 1* (см. с. 30).

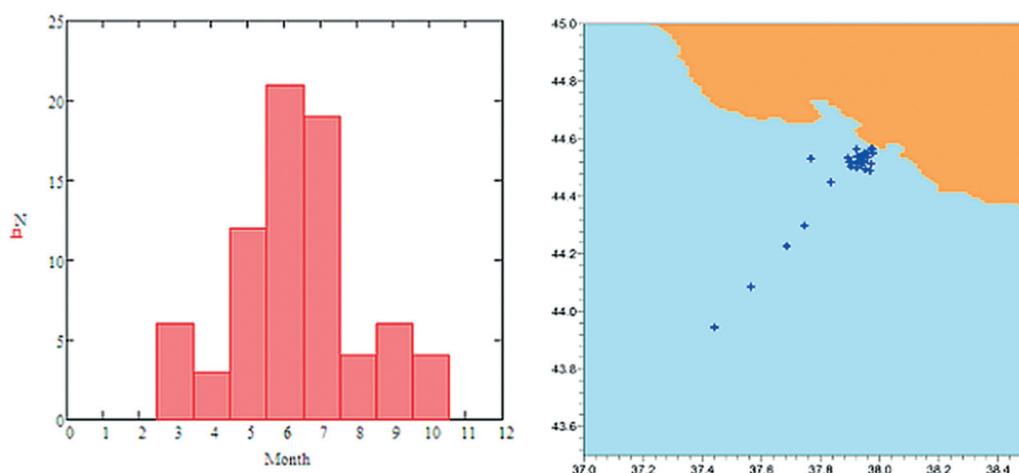


Рис. 2. Гистограмма распределения квазисинхронных значений по месяцам и месту отбора проб

Из полученной серии оставшихся после отбраковки облачности снимков извлечены спутниковые значения концентрации Chl-*a* и коэффициента яркости восходящего излучения R_{rs} в 6 каналах в диапазоне 412–678 нм в ближайшем к координатам контактных измерений пикселе. На следующем шаге были удалены точки с отрицательным значением восходящей яркости излучения R_{rs} на длине волны 412 нм, которые являются ошибками стандартной атмосферной коррекции NASA. Конечный массив состоит из 78 точек и представляет собой набор измеренных в поверхностном слое и спутниковых Chl-*a*, значений R_{rs} и координат: долготы и широты. Гистограмма распределения по месяцам полученного массива представлена на *рис. 2*.

Анализ данных

Пример прямого сопоставления спутниковых и контактных измерений приведён на *рис. 3*. Как видно из *рис. 3*, спутниковые значения, как правило, превышают контактные в 2–3 раза, а зависимость имеет несколько нелинейный характер.

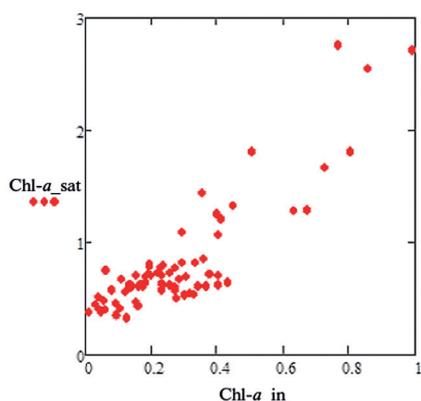


Рис. 3. Диаграмма сопоставления контактных и спутниковых данных Chl-*a* (мг/м³)

Рассчитанные коэффициенты для пересчёта спутниковых значений хлорофилла *a*, полученных по данным сканера MODIS-Aqua, для линейной регрессии измеренных и спутниковых значений концентрации хлорофилла *a* составили соответственно: $A = 0,354$, $B = -0,003$, уравнение пересчёта имеет вид:

$$\text{Chl-a}_{\text{reg}} = 0,354 \times \text{Chl-a}_{\text{sat}} - 0,003$$

и даёт ошибку 0,1 мг/м³ при коэффициенте корреляции 0,86. Устранение нелинейности в виде зависимости концентрации измеренных значений от логарифма спутниковых измерений дало следующую зависимость:

$$\text{Chl-a}_{\text{reg1}} = 0,38 \times \ln(\text{Chl-a}_{\text{sat}}) + 0,44.$$

Данная коррекция даёт те же значения ошибки и коэффициента корреляции, но несколько лучше восстанавливает значения в диапазоне 0,1–0,4 мг/м³ (рис. 4).

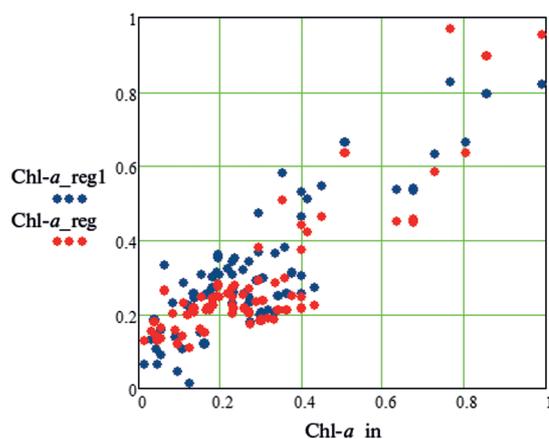


Рис. 4. Диаграммы рассеяния для скорректированных значений хлорофилла *a* по спутниковым значениям: Chl-*a*_reg1 — нелинейный алгоритм, Chl-*a*_reg — линейная регрессия

Таким образом, получены алгоритмы коррекции спутниковых значений концентрации хлорофилла для данных MODIS-Aqua в диапазоне до 1 мг/м³ в северо-восточной части Чёрного моря. Нелинейность зависимости спутниковых и измеренных значений может быть объяснена тем, что только часть концентрации растворённой органики коррелирует с концентрацией хлорофилла *a*. Попытка использования различных функциональных зависимостей для индексов не дала улучшения полученных ошибок. Отметим, что в зонах, подверженных речному стоку, оптимальные алгоритмы могут отличаться от вышеприведённых.

Причины различия

Нужно учитывать, что различия при сопоставлении дистанционных и контактных данных будут определяться, кроме собственно ошибок алгоритма, ещё и пространственно-временными характеристиками распределения хлорофилла *a*, а также физическими особенностями формирования сигнала в оптическом диапазоне.

Первый фактор вызывает ошибки, связанные с различием области сбора контактных проб и получения осреднённого по площади ($\sim 1 \times 1$ км) сигнала спутникового датчика. Пространственная изменчивость поля концентрации хлорофилла может достигать $0,5\text{--}0,7$ мг/м³ (в некорректированных спутниковых данных) на 1 км. Этот же фактор — существенная пространственная изменчивость — является определяющим при временной несогласованности снимка и контактного измерения. Так, при интервале времени 2–4 ч и скоростях течений 0,3 м/с расчётное пространственное несоответствие будет 2–4 км.

Особенно существенны такие ошибки при образовании субмезомасштабных и мезомасштабных структур в исследуемом районе, которые определяют высокую пространственную изменчивость оптических характеристик воды за счёт переноса на масштабах от сотен метров до единиц километров (Зацепин и др., 2011). Оценим возможные величины такого рода ошибок на примере сопоставления квазисинхронных данных сканеров OLI (Operational Land Imager) и MODIS. В качестве примера на *рис. 5* приведена карта концентрации хлорофилла *a*, полученная по данным сканера MODIS-Aqua 28 февраля 2017 г., на которой видна сложная структура поверхностной динамики в исследуемом районе и формируемые вихревыми структурами фронты в прибрежной зоне.

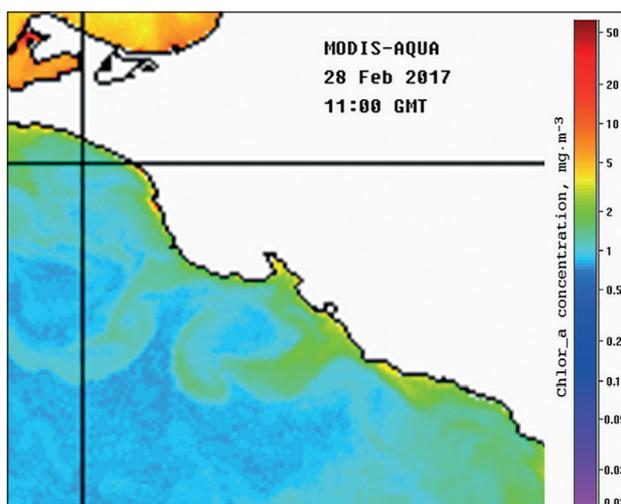


Рис. 5. Карта концентрации хлорофилла *a* по данным MODIS-Aqua, стандартный алгоритм NASA

Для оценки возможного отличия измеряемой в точке концентрации от осреднённой по площади 1 км и в случае пространственного несоответствия подобрано синхронное изображение сканера OLI с высоким пространственным разрешением. Полученные значения индекса $Rrs(560)/Rrs(490)$ далее пересчитаны в значения концентрации хлорофилла *a*. Для конкретного случая синхронных изображений вдоль разреза были сопоставлены, с приведением в одинаковое пространственное разрешение, значения концентрации хлорофилла по данным сканера MODIS и индекса $Rrs(560)/Rrs(490)$. Линейная регрессия использована для пересчёта индекса в значения концентрации хлорофилла для сканера OLI. Рассчитанные данные концентрации хлорофилла вдоль показанного разреза приведены на *рис. 6* вместе с разностью текущих значений в каждой точке со скользящим осреднёнными по интервалу 1 км (симуляция осреднения спутниковым сканером).

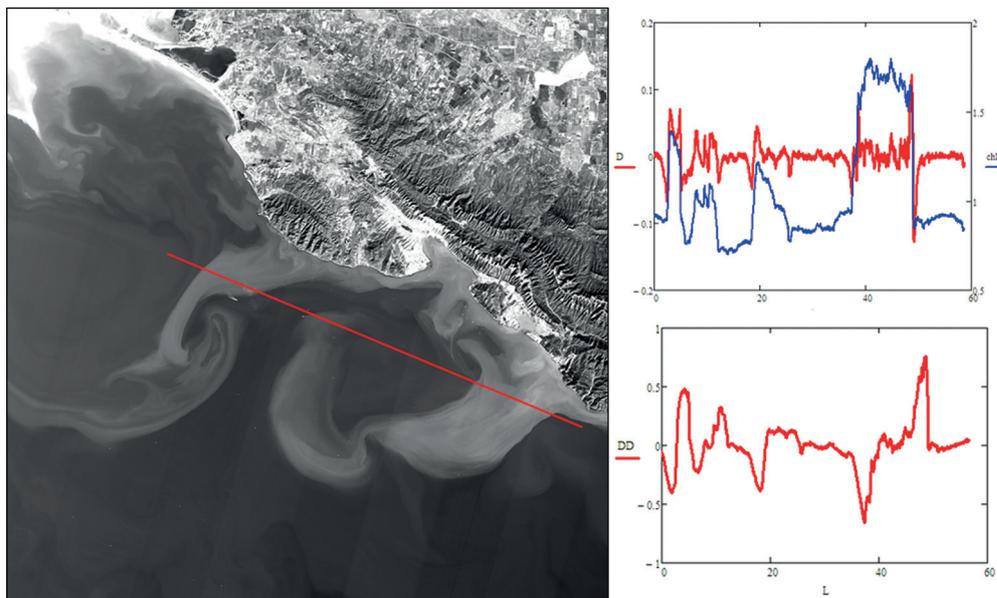


Рис. 6. Карта сине-зелёного индекса сканера OLI (слева). Верхняя вставка справа — изменение пересчитанной концентрации хлорофилла *a* (синяя линия) и разница между текущим значением и осреднённым по интервалу 1 км. Нижняя вставка — изменение разности концентрации хлорофилла *a* при смещении осреднённых вдоль разреза значений на 2 км

Полученное среднеквадратичное отклонение в этом случае составило $0,06 \text{ мг/м}^3$. На нижней диаграмме рис. 6 приведена разность значения в точке со смещёнными на 2 км осреднёнными по интервалу 1 км значениями — симуляция временного несоответствия. В этом случае значение среднеквадратичного отклонения составило $0,2 \text{ мг/м}^3$. Таким образом, пространственная неоднородность и временное рассогласование измерений в случае наличия субмезомасштабных процессов могут давать ошибки, сравнимые с полученными при прямом сопоставлении спутниковых и контактных наблюдений (или превышающие их). Отметим, что вихревые субмезомасштабные структуры могут как увеличивать концентрацию в ядре вихря, так и уменьшать её, формируя фронтальные зоны с большими градиентами (пример на рис. 7). Ядро вихря западнее Новороссийска сформировано водами с более низкими концентрациями взвеси по сравнению с окружающими, а в ядре аналогичного по размерам вихря южнее Новороссийска концентрации значительно выше окружающих.

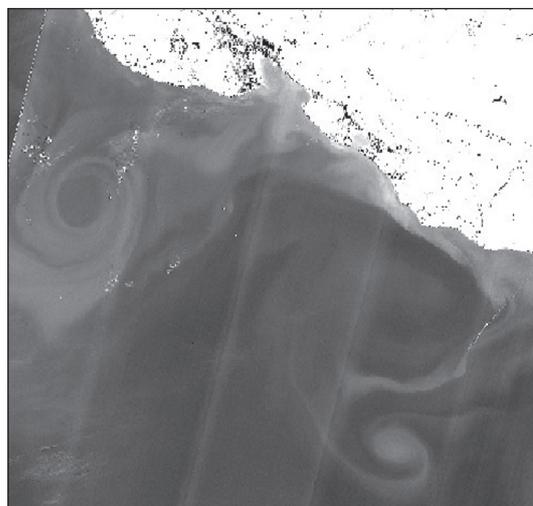


Рис. 7. Изображение сканера MSI (англ. Multispectral Instrument) с разрешением 10 м за 06.04.2016, демонстрирующее различное распределение взвеси в субмезомасштабных циклонах

Вторым источником ошибок при сопоставлении спутниковых и контактных данных может являться вертикальная неоднородность распределения хлорофилла *a* в поверхностном слое 0–10 м, где в основном формируются сигналы спутниковых сенсоров. Подобные ситуации достаточно типичны для Чёрного моря в весенне-летний период формирования сезонного термоклина, особенно при слабом перемешивании (слабых ветрах). В качестве примера на *рис. 8* приведены вертикальные профили концентрации хлорофилла *a*, полученные в ходе экспедиционных исследований контактным и флуориметрическим методами 3 июля 2017 г. на станциях с различной глубиной моря.

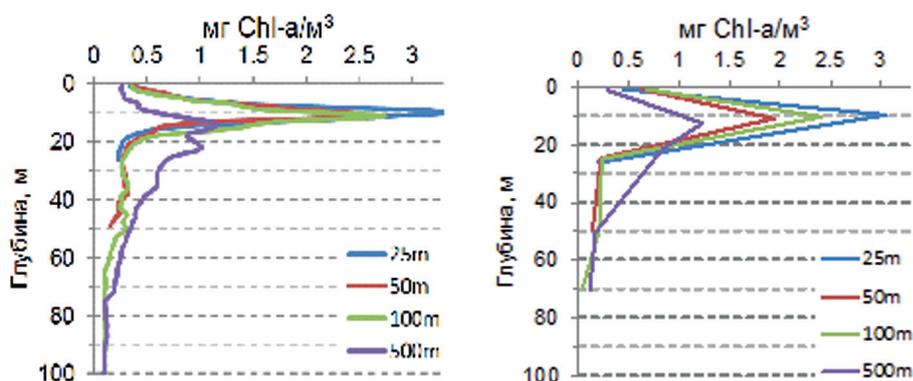


Рис. 8. Вертикальные профили концентрации хлорофилла *a*, полученные флуориметрическим (*слева*) и контактным (*справа*) методами на станциях с глубиной 25, 50, 100 и 500 м

Хорошо видно, что концентрации Chl-*a* на поверхности и глубине 10 м различаются на порядок. В этом случае яркость принимаемого спутником излучения будет формироваться поглощением хлорофилла *a* не только поверхностным слоем, но и глубже лежащими слоями, что будет приводить к большим расчётным значениям концентрации хлорофилла *a* по сравнению с измеренными в поверхностном слое. Этот фактор может также являться источником ошибок, достигающих 30–40 % при сопоставлении данных. Таким образом, значительный вклад в различие спутниковых и контактных измерений концентрации Chl-*a* могут вносить субмезомасштабные структуры, формирующие высокую пространственную изменчивость, в том числе и вертикальную.

Заключение

В результате проведённых исследований в Северо-восточной части Чёрного моря были предложены региональные алгоритмы коррекции спутниковых данных расчётных значений концентрации хлорофилла *a* для сканера MODIS-Aqua в весенний, летний и осенний сезоны. Ошибка в диапазоне концентраций хлорофилла *a* до 1 мг/м³ составила 0,1 мг/м³. Рассмотрены возможные источники ошибок при сопоставлении данных:

- различные физические принципы оценки концентрации;
- ошибки атмосферной коррекции;
- временное рассогласование;
- пространственное осреднение у спутниковых и точечные измерения у контактных данных;
- вертикальное распределение хлорофилла *a* в слое формирования коэффициента яркости;
- непостоянство вклада цветных пигментов.

Отмечен вклад субмезомасштабных структур и особенностей вертикального распределения в различие измеряемых контактными методами и спутниковых значений хлорофилла *a*.

Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда «Роль короткопериодных и мезомасштабных процессов в формировании структуры планктона и биологической продуктивности на примере Чёрного моря» и государственного задания № 0827-2019-0002.

Литература

1. Арашкевич Е. Г., Луппова Н. Е., Никишина А. Б., Паутова Л. А., Часовников В. К., Дриц А. В., Подымов О. И., Романова Н. Д., Станичная Р. Р., Зацепин А. Г., Куклев С. Б. Судовой экологический мониторинг в шельфовой зоне Черного моря: оценка современного состояния пелагической экосистемы // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 6. С. 964–964.
2. Зацепин А. Г., Кондрашов А. А., Корж А. О., Кременецкий В. В., Островский А. Г., Соловьев Д. М. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
3. Суетин В. С., Суслин В. В., Королев С. Н., Кучерявый А. А. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 года по данным спутникового прибора SeaWiFS // *Морской гидрофиз. журн.* 2002. № 6. С. 44–54.
4. Holm-Hansen O., Riemann B. Chlorophyll *a* determination: improvements in methodology // *Oikos*. 1978. V. 30. P. 438–447.
5. Holm-Hansen O., Lorenzen C. J., Holmes R. W., Strickland J. D. H. Fluorometric determination of chlorophyll // *ICES J. Marine Science*. 1965. V. 30. P. 3–15.
6. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Ershova S. V., Sheberstov S. V., Evdoshenko M. A. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // *Deep-Sea Research II*. 2004. V. 51. P. 1063–1091.
7. Morozov E. A., Korosov A. A., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H., Sychev V. I. A new area-specific bio-optical algorithm for the Bay of Biscay and assessment of its potential for SeaWiFS and MODIS/Aqua data merging // *Intern. J. Remote Sensing*. 2010. V. 31. No. 24. P. 6541–6565.
8. Moses W. J., Gitelson A. A., Berdnikov S., Povazhnyy V. Estimation of chlorophyll-*a* concentration in case II waters using MODIS and MERIS data — successes and challenges // *Environmental Research Letters*. 2009. V. 4. No. 4. 8 p.
9. O'Reilly J. E., Maritorena S., O'Brien M. C., Siegel D. A., Toole D., Menzies D., Smith R. C., Mueller J. L., Mitchell B. G., Kahru M., Chavez F. P., Strutton P., Cota G. F., Hooker S. B., McClain C. R., Carder K. L., Müller-Karger F., Harding L., Magnuson A., Phinney D., Moore G. F., Aiken J., Arrigo K. R., Letelier R., Culver M. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses. Pt. 3. V. 11. NASA Tech. Memo 2000–206892 / eds. S. B. Hooker, E. R. Firestone. NASA Goddard Space Flight Center, 2000. 49 p.
10. Suslin V. 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 // *Intern. J. Remote Sensing*. 2016. V. 37. No. 18. P. 4380–4400.

Regionally adapted algorithm for the recovery of chlorophyll *a* concentration for the Black Sea, analysis of the reasons for the difference between satellite and contact data

R. R. Stanichnaya¹, S. V. Stanichny¹, E. G. Arashkevich²

¹ *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*
E-mails: rrsta@mail.ru, sstanichny@mail.ru

² *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: aelena@ocean.ru

The paper proposes a regression method for correcting standard chlorophyll *a* concentration data of the MODIS-Aqua satellite sensor for the Black Sea. Regression coefficients are obtained by comparing satellite and contact measurements for the northeastern Black Sea for 2006–2017. Two formulas

for satellite data correction are considered: linear and logarithmic. The resulting estimation error in both cases was 0.1 mg/m^3 in the concentration range up to 1 mg/m^3 . The reasons of possible difference of satellite and contact measurements related to spatial inhomogeneity of chlorophyll *a* concentration on scale of about 1 km (area of averaging of satellite sensor), nonsynchronous measurements leading to displacement of spatial structures in presence of currents, as well as with possible change of chlorophyll *a* concentration with depth in the zone of signal formation of optical radiometers ($\sim 0\text{--}10 \text{ m}$) are considered.

Keywords: chlorophyll, remote sensing, *in situ* data, regional algorithm, Black Sea

Accepted: 10.07.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-29-37

References

1. Arashkevich E. G., Nikishina A. B., Pautova L. A., Drits A. V., Romanova N. D., Zatsepin A. G., Flint M. V., Louppova N. E., Chasovnikov V. K., Podymov O. I., Kuklev S. B., Stanichnaya R. R., Marine environmental monitoring in the shelf zone of the Black Sea: Assessment of the current state of the pelagic ecosystem, *Oceanology*, 2015, Vol. 55, No. 6, pp. 871–876.
2. Zatsepin A. G., Kremenetskiy V. V., Ostrovskii A. G., Baranov V. I., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Soloviev D. M., Submesoscale eddies at the Caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation, *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 554–567.
3. Suetin V. S., Suslin V. V., Korolev S. N., Kucheryavyi A. A., Analysis of the Variability of the Optical Properties of Water in the Black Sea in Summer 1998 According to the Data of a SeaWiFS Satellite Instrument, *Physical Oceanography*, 2002, Vol. 12, Issue 6, pp. 331–340.
4. Holm-Hansen O., Riemann B., Chlorophyll *a* determination: improvements in methodology, *Oikos*, 1978, Vol. 30, pp. 438–447.
5. Holm-Hansen O., Lorenzen C. J., Holmes R. W., Strickland J. D. H., Fluorometric determination of chlorophyll, *ICES J. Marine Science*, 1965, Vol. 30, pp. 3–15.
6. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Ershova S. V., Sheberstov S. V., Evdoshenko M. A., Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas, *Deep-Sea Research II*, 2004, Vol. 51, pp. 1063–1091.
7. Morozov E. A., Korosov A. A., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H., Sychev V. I., A new area-specific bio-optical algorithm for the Bay of Biscay and assessment of its potential for SeaWiFS and MODIS/Aqua data merging, *Intern. J. Remote Sensing*, 2010, Vol. 31, No. 24, pp. 6541–6565.
8. Moses W. J., Gitelson A. A., Berdnikov S., Povazhnyy V., Estimation of chlorophyll-*a* concentration in case II waters using MODIS and MERIS data — successes and challenges, *Environmental Research Letters*, 2009, Vol. 4, No. 4, 8 p.
9. O'Reilly J. E., Maritorena S., O'Brien M. C., Siegel D. A., Toole D., Menzies D., Smith R. C., Mueller J. L., Mitchell B. G., Kahru M., Chavez F. P., Strutton P., Cota G. F., Hooker S. B., McClain C. R., Carder K. L., Müller-Karger F., Harding L., Magnuson A., Phinney D., Moore G. F., Aiken J., Arrigo K. R., Letelier R., Culver M., *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3, Vol. 11, NASA Tech. Memo 2000–206892*, S. B. Hooker, E. R. Firestone (eds.), NASA Goddard Space Flight Center, 2000, 49 p.
10. 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, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, No. 18, pp. 4380–4400.