



УДК 581.132.1:551.501.86(262.5)

## ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *A* В ЧЁРНОМ МОРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

© 2019 г. З. З. Финенко<sup>1</sup>, И. М. Мансурова<sup>1</sup>, В. В. Суслин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

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

E-mail: [zosim\\_finenko@mail.ru](mailto:zosim_finenko@mail.ru)

Поступила в редакцию 23.10.2018; после доработки 21.01.2019;  
принята к публикации 22.05.2019; опубликована онлайн 24.06.2019.

В отличие от контактных методов, использование спутниковых данных для изучения динамики хлорофилла *a* даёт возможность проводить исследования на больших масштабах с высокой частотой измерений. Такие наблюдения выполнены в глубоководной части и прибрежном районе Чёрного моря в период с 1998 по 2015 г. Они позволили определить годовую динамику концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое и выявить периодичность, интенсивность и продолжительность массового развития водорослей. Годовая динамика концентрации хлорофилла в западном и восточном циклонических круговоротах, а также в зоне шельфа у крымских и кавказских берегов имела одинаковый характер, повторяющийся из года в год. С августа-сентября по апрель-май следующего года изменение хлорофилла в большинстве случаев соответствовало нормальному распределению и имело вид колоколообразной кривой с максимумом в декабре-январе. В течение осеннего периода значения концентрации хлорофилла постепенно повышались по мере охлаждения воды, ослабления сезонного пикноклина и увеличения скорости потока биогенных веществ из нижних слоёв к поверхности. Зимой глубина перемешиваемого слоя достигала значений, в несколько раз больших, чем осенью, что могло приводить к уменьшению концентрации хлорофилла в единице объёма воды. Весеннее интенсивное развитие фитопланктона наблюдалось в конце марта — начале апреля при ослаблении конвективного перемешивания и повышении устойчивости водного столба.

**Ключевые слова:** хлорофилл *a*, спутниковые измерения, Чёрное море, фитопланктон

В Чёрном море проведено большое количество исследований пространственной и временной изменчивости концентрации хлорофилла *a* (далее в тексте для словосочетания «концентрация хлорофилла *a*» используется «Хл») [6, 12, 24]. Обобщение результатов показывает, что в глубоководных районах моря Хл в течение года изменяется по единой схеме: относительно высокие концентрации наблюдаются в холодное время года при температуре воды ниже +15 °С, минимальные — летом. В прибрежных районах характер сезонных изменений более разнообразен: как правило, исследователи отмечают несколько всплесков фитопланктона в течение года [2, 10]. Эти результаты получены путём осреднения разрозненных измерений, выполненных в ограниченных акваториях в разные годы и сезоны. Такие данные не учитывают межгодовые сезонные колебания, их трудно экстраполировать на другие физико-географические районы моря. Высокая вариабельность данных требует проведения исследований на больших масштабах с высокой частотой измерений, чего трудно достигнуть в экспедиционных условиях. Использование спутниковых наблюдений для изучения динамики Хл позволяет избежать многих сложностей, связанных с частотой измерений и с пространственным разрешением. В отличие от авторов ранее опубликованных

работ [12, 14], мы использовали данные трёх спутников, что позволило существенно уменьшить потерю информации, связанную с облачностью, особенно в зимний период, и более точно описать динамику Хл.

Цель работы — определить динамику концентрации хлорофилла *a*, периодичность, интенсивность и продолжительность массового развития водорослей в различных физико-географических районах Чёрного моря.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

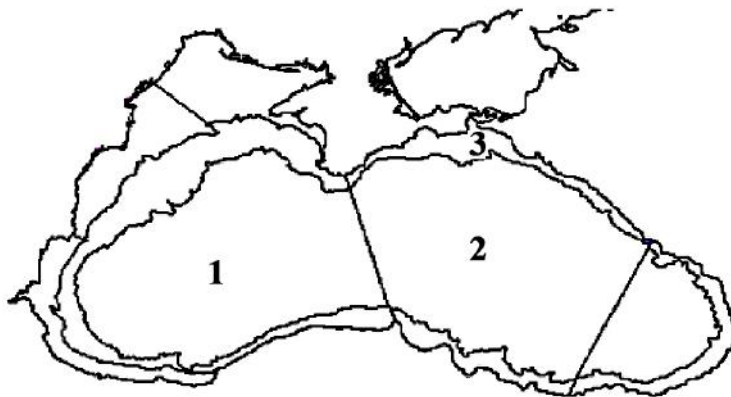
Для расчёта Хл в поверхностном слое использованы данные второго уровня, полученные с помощью приборов SeaWiFS (1998–2010) и MODIS-Aqua/Terra (2000–2015). Методика восстановления Хл по данным этих спутниковых измерений даёт одни и те же результаты. Это показано на интервале времени (2002–2008), где одновременно выполнялись измерения SeaWiFS и MODIS-Aqua/Terra [23]. Глубина сканирования слоя в глубоководной части составляла 5–15 м, в прибрежных районах северо-западного шельфа — 0,2–1,0 м. В целом слой формирования сигнала равен обратной величине показателя вертикального ослабления света. Зимой Хл распределена равномерно в слое 0–40 м. В летний период максимум Хл по флуоресценции фитопланктона находится на глубинах 19–38 м [11] и не участвует в формировании сигнала.

Как известно, стандартные алгоритмы NASA дают завышенные величины Хл в поверхностном слое Чёрного моря по сравнению с измеренными значениями [5]. Это связано с тем, что содержание растворённого окрашенного вещества в Чёрном море больше, чем в океане. Для учёта влияния растворённого окрашенного вещества на Хл в статье [23] предложен алгоритм с использованием коэффициента яркости моря в трёх спектральных каналах. Этот алгоритм применён в настоящей работе. По этим данным были рассчитаны два отношения коэффициентов яркости моря, с помощью которых вычислена Хл с последующим усреднением на пространственной сетке  $0.025^\circ$  по широте и  $0.035^\circ$  по долготе за двухнедельный период. Применённый нами алгоритм более точно восстанавливает Хл по спутниковым данным, чем алгоритмы, использованные ранее [14, 21]. Средняя относительная ошибка восстановления Хл по этому алгоритму для глубоководной части Чёрного моря по данным SeaWiFS и MODIS-Aqua/Terra составила 40 % [3].

При определении продукционных циклов (далее — ПЦ) началом цикла считали увеличение Хл на 40 % и более по сравнению с предыдущим значением, окончанием — уменьшение на 40 %.

Для сравнения динамики Хл выбрали три района:

- 1 — западный циклонический круговорот;
- 2 — восточный циклонический круговорот;
- 3 — район шельфа и континентального склона в северной части моря у берегов Крыма и Кавказа (рис. 1).



**Рис. 1.** Карта-схема расположения районов

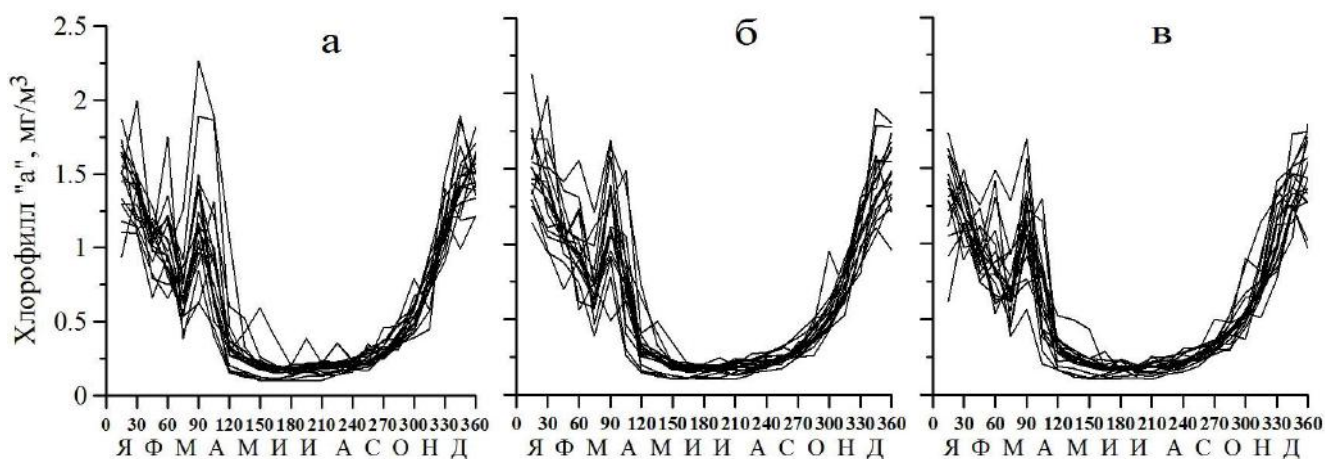
**Fig. 1.** The map of the regions

Температура в поверхностном слое и интенсивность фотосинтетически активной радиации (далее — ФАР) в диапазоне 400–700 нм, достигающей поверхности моря, получены из спутниковых наблюдений, которые взяты с сайта <http://podaac.jpl.nasa.gov/sst/>, и стандартных спутниковых продуктов второго уровня SeaWiFS и MODIS-Aqua/Terra.

Для статистической обработки данных использован пакет программ Sigma Plot 12.5. Во всех случаях приведены среднее значение  $\pm$  стандартное отклонение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

*Динамика концентрации хлорофилла а.* Динамика Хл на протяжении 18 лет имеет вид U-образной кривой (рис. 2). С января по март наблюдается снижение Хл, за которым следует повышение в течение короткого периода весной. Летом значения Хл минимальны. Осенью она плавно повышается, в декабре достигает максимальных значений. В целом годовая динамика Хл в трёх районах имеет одинаковый характер.



**Рис. 2.** Годовая динамика концентрации хлорофилла *a* в районах 1 (а), 2 (б) и 3 (в) в 1998–2015 гг.

**Fig. 2.** The annual dynamics of chlorophyll *a* concentration in regions 1 (а), 2 (б), and 3 (в) in 1998–2015

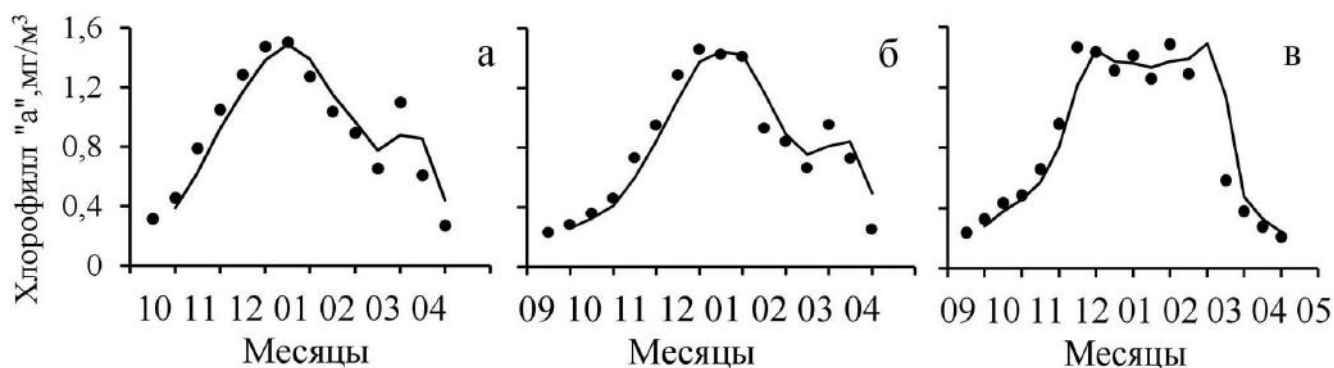
С августа-сентября по апрель-май следующего года кривая изменения Хл в большинстве случаев имеет колоколообразный вид с максимумом в декабре-январе (рис. 3). Проверка по критерию Шапиро — Уилка показала, что для трёх районов изменение Хл в 88 % случаев соответствует нормальному распределению (рис. 3а, б). В остальных случаях несоответствие связано либо с одинаковой Хл на различных участках колоколообразной кривой в течение 1,5–4,0 мес. (рис. 3в), либо с резким короткопериодным повышением значений Хл в феврале и марте.

Продолжительность ПЦ варьировала от 6,5 до 10,0 мес.; средневзвешенное значение в трёх районах — от 7,5 до 8,1 мес. Амплитуда ПЦ изменялась от 1,2 до 2,1  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Средние значения в районах 1 и 2 составили  $(1,64 \pm 0,19)$  и  $(1,63 \pm 0,22)$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$  соответственно, в районе 3 —  $(1,50 \pm 0,19)$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

В отдельные сезоны зафиксированы короткопериодные повышения Хл, связанные с интенсивным развитием водорослей.

В каждом из исследованных районов в январе-феврале в 14 % случаев отмечено интенсивное развитие фитопланктона длительностью 1 месяц. В течение этого времени Хл увеличивалась в 1,4–1,8 раза, достигая 0,95–1,75  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . ФАР в данный период находилась в пределах от 8,0 до 17,0, составляя в среднем  $(12,5 \pm 3,4)$  моль квантов $\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сутки}^{-1}$ . Температура варьировала от +7,9 до +10,2 °С.

Весеннее «цветение» фитопланктона в районе 1 встречалось практически ежегодно в конце марта — начале апреля; его интенсивность и продолжительность зависели от холодных и тёплых зим. Зима считалась холодной, когда температура воды в поверхностном слое в феврале опускалась



**Рис. 3.** Примеры изменения концентрации хлорофилла *a* с сентября-октября по апрель-май следующего года: кривые (а) и (б) соответствуют нормальному распределению, кривая (в) не соответствует

**Fig. 3.** Examples of chlorophyll *a* variation from September-October to April-May of the next year: curves (a) and (б) correspond to normal distribution, curve (в) does not correspond

ниже  $+7^{\circ}\text{C}$ . В первом районе такое снижение температуры зарегистрировано 8 раз в течение 18 лет, во втором районе — 3 раза, в третьем — 1, поэтому разделение на годы с тёплой и холодной зимой сделано только для первого района. В годы с холодной зимой в районе 1 продолжительность весеннего развития составила  $(1,4 \pm 0,2)$  мес., в годы с тёплой зимой —  $(1,2 \pm 0,3)$  мес. В этот период года Хл увеличивалась в среднем в 1,9 и 1,8 раза соответственно, достигая максимальных значений —  $(1,47 \pm 0,54)$  и  $(1,06 \pm 0,30)$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Таким образом, продолжительность весеннего развития водорослей достоверно не зависела от температуры воды зимой, в то время как амплитуда Хл в годы с холодными зимами была выше. В районах 2 и 3 весеннее «цветение» фитопланктона отсутствовало в двух и четырёх случаях в течение 18 лет соответственно; минимальная температура воды в поверхностном слое в эти годы находилась в пределах  $+7,0\dots+8,3^{\circ}\text{C}$ . В данных районах средневзвешенная продолжительность интенсивного развития водорослей составила 1,3 и 1,5 мес. соответственно. В этот период Хл увеличивалась в среднем в 1,7 и 1,8 раза, а средние значения амплитуды достигали  $(1,20 \pm 0,30)$  и  $(1,22 \pm 0,23)$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Массовое развитие фитопланктона весной в районах 1, 2 и 3 проходило при средних значениях температуры  $(7,8 \pm 0,8)$ ,  $(8,2 \pm 0,9)$  и  $(8,5 \pm 0,9)^{\circ}\text{C}$  соответственно и при средних значениях ФАР  $28,8\text{--}30,6$  моль квантов $\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сутки}^{-1}$ .

Летом короткопериодные (продолжительностью 1 месяц) вспышки в развитии фитопланктона амплитудой  $0,35\text{--}0,39$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$  зафиксированы только в районе 1 три раза за 18 лет.

В осенний период «цветение» фитопланктона в районе 1 зарегистрировано два раза, в районе 2 — один раз. Продолжительность составляла не более 1 месяца, в течение которого Хл увеличивалась в 1,5–2,0 раза. В прибрежной зоне «цветения» не было.

Влияние температуры на динамику хлорофилла *a*. С августа-сентября по декабрь между температурой воды и Хл наблюдалась обратная зависимость, которую можно описать экспоненциальной функцией с высоким коэффициентом детерминации (рис. 4а):

$$\text{Хл} = 5,797 \times \exp^{(-0,133 \cdot t)}, \quad n = 379, \quad (1)$$

где Хл — концентрация хлорофилла *a*,  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;

*t* — температура воды в поверхностном слое,  $^{\circ}\text{C}$ .

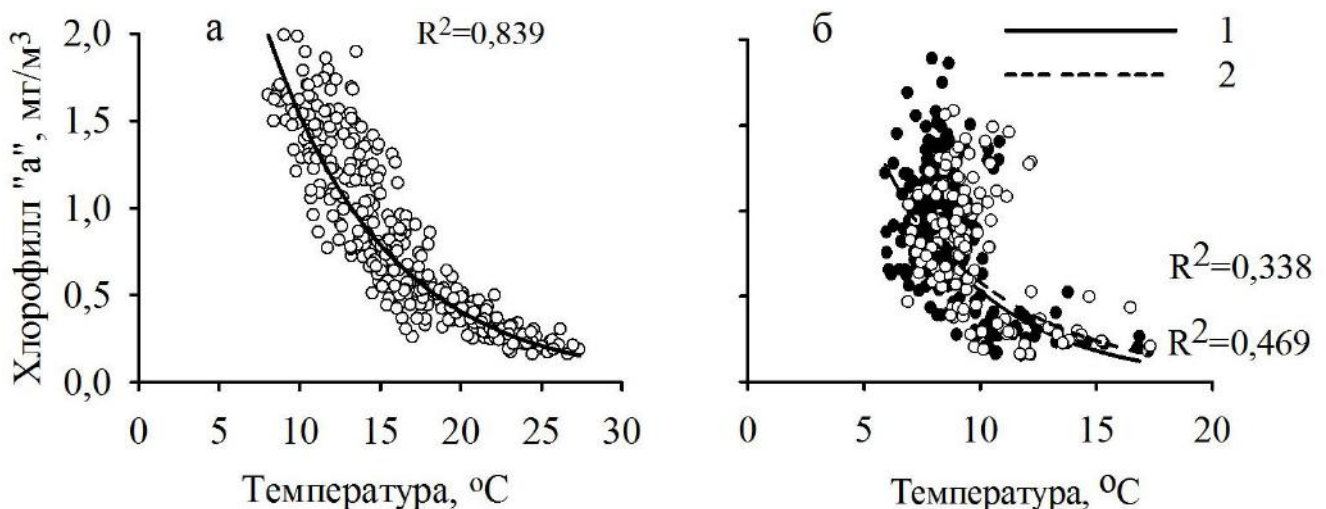
При уменьшении температуры с  $+27$  до  $+18^{\circ}\text{C}$  Хл изменялась мало. Её резкое увеличение наблюдалось при снижении температуры с  $+18$  до  $+8^{\circ}\text{C}$ . В данном случае температура — это косвенный показатель, отвечающий за изменение Хл. С уменьшением температуры в поверхностном слое ослабевает температурный градиент, в результате чего скорость потока биогенных веществ с более глубоких слоёв к поверхности возрастает. Именно поэтому можно предположить, что осенью и в начале зимы основным фактором, контролирующим развитие фитопланктона, является скорость потока биогенных веществ.

В западном и восточном круговоротах Хл в целом уменьшается с января по апрель-май. Самые высокие значения отмечены при температурах ниже +6 °С. При +10 °С они в среднем в 2 раза меньше. В этот период, как и осенью, снижение Хл можно достоверно описать экспоненциальной функцией (рис. 4б), но с более низким коэффициентом детерминации. В западном и восточном круговоротах зависимость можно описать уравнением (2), на шельфе — уравнением (3):

$$\text{Хл} = 4,500 \times \exp^{(-0,214 \cdot t)}, \quad n = 244, \quad (2)$$

$$\text{Хл} = 3,393 \times \exp^{(-0,177 \cdot t)}, \quad n = 129. \quad (3)$$

Обозначения те же, что и в уравнении (1).



**Рис. 4.** Зависимость концентрации хлорофилла *a* от температуры с сентября-октября по декабрь для западного, восточного круговоротов и шельфовой зоны (а) и с января по апрель-май (б) — для западного и восточного круговоротов (1) и для шельфовой зоны (2)

**Fig. 4.** The dependence of chlorophyll *a* concentration on temperature from September-October to December for the western and eastern cyclonic gyres and the shelf zone (a) and from January to April-May (b) – for the western and eastern cyclonic gyres (1) and for the shelf zone (2)

Из приведённых результатов следует, что в годы с холодными зимами Хл в поверхностном слое должна быть выше, чем в годы с тёплыми зимами. В то же время в шельфовой зоне у берегов Кавказа и Крыма величины Хл в поверхностном слое в меньшей степени зависят от температуры воды. Различия связаны, очевидно, с разницей между механизмами, отвечающими за доставку биогенных веществ в зону фотосинтеза. В прибрежных районах зимой они в основном поступают с береговым стоком, а в открытых районах моря — с глубинными водами.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Чёрное море — один из наиболее стратифицированных районов в Мировом океане. Его отличительной чертой является наличие узких слоёв с большим перепадом плотности. Сезонный пикноклин существует с апреля по ноябрь в слое 15–20 м, постоянный пикноклин — на глубинах от 50 до 100 м [1]. Эта особенность Чёрного моря определяет гидрохимический режим и ПЦ фитопланктона в течение года. В глубоководной части и в шельфовых водах у берегов Крыма и Кавказа характер изменения Хл в течение года одинаков. Минимальные значения наблюдаются летом, и они на порядок величин ниже, чем в другие сезоны.

С августа-сентября по апрель-май следующего года наблюдается нормальное распределение Хл. Колоколообразная форма кривой связана с размыванием пикноклина осенью и с увеличением глубины перемешиваемого слоя зимой. Постоянство величин в течение относительно длительного времени, отмечаемое в некоторых случаях, возможно тогда, когда прирост водорослей равен их убыли в результате выедания зоопланктоном.

Наибольшие значения Хл отмечены в декабре-январе. После достижения максимума уменьшается Хл, снижается температура воды и повышается глубина перемешиваемого слоя, которая может достигать 60 м в конце февраля — первой половине марта [18, 19]. В это время между температурой и Хл наблюдается более низкая корреляция, чем осенью, поэтому можно предположить, что на динамику Хл в этот период могут влиять не только температурный режим, но и другие факторы, такие как отношение критической глубины к глубине перемешивания.

Во второй половине марта — начале апреля интенсивность конвективного перемешивания ослабевает, глубина перемешиваемого слоя уменьшается до 30 м. Столб воды приобретает некоторую стабильность, начинается весеннее «цветение» перед формированием сезонного термоклина, который, как правило, образуется в апреле [1, 19]. Продолжительность и амплитуда весеннего «цветения» зависят от климатических условий: в годы с холодной зимой они больше, чем в годы с тёплой. Короткопериодное увеличение Хл может наблюдаться в феврале в годы с тёплой зимой, когда ветровой режим на короткое время ослабевает. Тогда же может формироваться подповерхностный градиент плотности, что приводит к повышению стабильности водного столба. При наличии биогенных веществ в этом слое происходит быстрый рост биомассы фитопланктона [8, 9, 13]. Такое явление может наблюдаться в холодный период года при глубоком перемешивании водного столба [15].

Осенью Хл постепенно повышается по мере охлаждения воды и ослабления сезонного пикноклина. Это подтверждает высокая корреляция между изменением температуры и Хл. В это время формируются благоприятные условия для проникновения биогенных веществ, поддерживающих рост биомассы фитопланктона с сентября по декабрь, из глубины к поверхности. Глубина перемешиваемого слоя находится в пределах зоны фотосинтеза, а значит, не ограничивает рост водорослей. Индикатором обеспеченности биогенными веществами в этот период может служить интенсивное развитие крупноклеточной водоросли *Pseudosolenia calcar-avis* [22].

Анализ динамики Хл в Чёрном море по спутниковым данным был выполнен А. С. Микаэляном с соавторами на основе многолетних данных [16, 17]. В этих работах для восстановления Хл по спутниковым наблюдениям использовали два алгоритма:

- 1) разработанный NASA и скорректированный для специальных условий открытых вод Чёрного моря [16];
- 2) разработанный для Чёрного моря в Институте океанологии имени П. П. Ширшова (далее — ИО РАН) [14].

Среднегодовые данные по обоим алгоритмам были достаточно близки между собой. Максимум Хл превышал минимум по скорректированному алгоритму NASA в 10 раз, а по алгоритму ИО РАН — в 3 раза. По алгоритму, использованному нами, эти различия достигали 5–10 раз. Пики Хл были определены при росте концентрации хлорофилла *a* более чем в 1,3 раза по скорректированному алгоритму NASA и в 1,1 раза — по алгоритмам ИО. При принятии этих критериев авторы не приводят ошибку восстановления Хл по спутниковым данным. Также авторы, ссылаясь на исследования, выполненные в Эгейском море [7], считают, что оригинальный алгоритм NASA завышает Хл в Чёрном море, но точно передаёт относительные изменения. В то же время специальные исследования, проведённые для условий Чёрного моря, показывают, что ошибка восстановления Хл по алгоритму NASA неодинакова в различные сезоны года; следовательно, различаться будут и относительные изменения Хл [4]. Относительная ошибка расчёта Хл по алгоритмам ИО РАН составляет около 80 % [3].

Использование разных алгоритмов приводит к различиям в динамике Хл. Так, по скорректированному алгоритму NASA и по алгоритму ИО РАН, вариабельность межгодовых среднемесячных значений Хл уменьшается с декабря по апрель, а весеннее развитие фитопланктона регистрируют только в годы с холодными зимами [16]. По нашим данным, вариабельность в течение этого периода увеличивается. Весеннее развитие фитопланктона зафиксировано как в холодные, так и в тёплые годы, но в годы с тёплой зимой оно было менее интенсивным и встречалось не каждый год.

Динамика Хл, определённая нами, совпадает с данными *in situ*. По результатам измерений, выполненных в 1998–2000 гг. в районе 1 и в районе континентального склона у Крыма (район 3), годовая динамика Хл имеет вид U-образной кривой [6]. Весеннее развитие фитопланктона в конце марта 1998 г. зарегистрировано как по спутниковым данным, так и по данным *in situ*. Регулярные исследования, проведённые на выходе из пролива Босфор в 1996–2001 гг., также показали, что максимальные Хл регулярно наблюдались зимой и осенью, а минимальные — летом [20].

В целом в течение 18-летнего периода в глубоководной части моря и в зоне шельфа у берегов Крыма и Кавказа динамика развития фитопланктона повторялась из года в год.

### Выводы:

1. Сезонные изменения концентрации хлорофилла *a* в течение 18-летнего периода в глубоководной части моря и в районе шельфа и континентального склона в северной части моря у берегов Крыма и Кавказа были одинаковыми. Максимальные величины зафиксированы в зимне-весенний и осенний периоды, минимальные — летом.
2. Вспышки в развитии фитопланктона отмечены во все сезоны, но с разной частотой. Весеннее «цветение» водорослей регистрировали в конце марта — начале апреля в западной части моря практически ежегодно, в восточной и в районе шельфа и континентального склона — в среднем в 83 % случаев. Интенсивность «цветения» в холодные годы была выше, чем в годы с тёплой зимой. В зимний период массовое развитие водорослей происходило в среднем один раз в три года, летом и осенью — по три раза за всё время наблюдений.
3. Динамика концентрации хлорофилла *a* с августа-сентября по апрель-май следующего года в большинстве случаев имела вид колоколообразной кривой с максимумом в декабре-январе. С сентября по декабрь по мере охлаждения воды отмечена обратная зависимость между концентрацией хлорофилла *a* и температурой в поверхностном слое. С января по апрель-май зависимость имела такой же вид.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИМБИ по теме «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (№ гос. регистрации АААА-А18-118021490093-4) и государственного задания МГИ РАН по теме «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (№ гос. регистрации АААА-А18-118012690119-7), а также при частичной поддержке проекта РАН «Влияние физико-химических процессов на смену видового состава и продуктивность морского фитопланктона» (№ гос. регистрации АААА-А18-118020790209-9).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. *Океанография Черного моря* / НАН Украины, Морской гидрофизический институт. Севастополь, 2011. 212 с. [Ivanov V. A., Belokopytov V. N. *Okeanografiya Chernogo morya* / NAN Ukrainy, Morskoi gidrofizicheskii institut. Sevastopol, 2011, 212 p. (in Russ.)]
2. Кропотов С. И., Кривенко О. В. Хлорофилл «*a*» и продукты его распада в водах Черного моря: сезонная и межгодовая изменчивость // *Журнал общей биологии*. 1999. Т. 60, № 5. С. 556–570. [Kropotov S. I., Krivenko O. V. Chlorophyll “*a*” and products of its decay in the Black Sea: seasonal and interannual

- variability. *Zhurnal obshchei biologii*, 1999, vol. 60, no. 5, pp. 556–570. (in Russ.)]
3. Суслин В. В., Чурилова Т. Я., Ли М. Е., Мончева С., Финенко З. З. Концентрация хлорофилла-*a* в Черном море: сравнение спутниковых алгоритмов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 64–72. [Suslin V. V., Churilova T. Ya., Li M. E., Moncheva S., Finenko Z. Z. Comparison of the Black sea chlorophyll-*a* algorithms for SeaWiFS and MODIS instruments. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 64–72. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S2073667318030085>
  4. 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. *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 24–42. (in Russ.)]
  5. Финенко З. З., Суслин В. В., Чурилова Т. Я. Региональная модель для расчёта первичной продукции Чёрного моря с использованием данных спутникового сканера цвета SeaWiFS // *Морской экологический журнал*. 2009. Т. 8, № 1. С. 81–106. [Finenko Z. Z., Suslin V. V., Churilova T. Ya. The regional model to calculate the Black Sea primary production using satellite color scanner SeaWiFS. *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2009, vol. 8, no. 1, pp. 81–106. (in Russ.)]
  6. Berseneva G. P., Churilova T. Ya., Georgieva L. V. Seasonal variability of the chlorophyll and phytoplankton biomass in the western part of the Black Sea. *Oceanology*, 2004, vol. 44, no. 3, pp. 362–371.
  7. Burenkov V. I., Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Ershova S. V., Evdoshenko M. A. Bio-optical characteristics of the Aegean Sea retrieved from satellite ocean color data. In: *The Eastern Mediterranean as a Laboratory Basin for the Assessment of Contrasting Ecosystems* / Malanotte-Rizzoli P., Eremeev V. N. (Eds). Dordrecht: Springer, 1999, pp. 313–326. (NATO Sci. Ser. ; vol. 51). [https://doi.org/10.1007/978-94-011-4796-5\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4796-5_21)
  8. Chiswell S. M. Annual cycles and spring blooms in phytoplankton: Don't abandon Sverdrup completely. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, vol. 443, pp. 39–50. <https://doi.org/10.3354/meps09453>
  9. Chiswell S. M., Calil P. H. R., Boyd P. W. Spring blooms and annual cycles of phytoplankton: A unified perspective. *Journal of Plankton Research*, 2015, vol. 37, iss. 3, pp. 500–508. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbv021>
  10. Demidov A. B. Seasonal dynamics and estimation of the annual primary production of phytoplankton in the Black Sea. *Oceanology*, 2008, vol. 48, iss. 5, pp. 664–678. <https://doi.org/10.1134/S0001437008050068>
  11. Finenko Z. Z., Churilova T. Ya., Li R. I. Dynamics of the vertical distributions of chlorophyll and phytoplankton biomass in the Black Sea. *Oceanology*, 2005, vol. 45, suppl. 1, pp. 112–126.
  12. Finenko Z. Z., Suslin V. V., Kovaleva I. V. Seasonal and long-term dynamics of the chlorophyll concentration in the Black Sea according to satellite observations. *Oceanology*, 2014, vol. 54, iss. 5, pp. 596–605. <https://doi.org/10.1134/S0001437014050063>
  13. Franks P. J. S. Has Sverdrup's critical depth hypothesis been tested? Mixed layers vs. turbulent layers. *ICES Journal of Marine Science*, 2014, vol. 72, iss. 6, pp. 1897–1907. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu175>
  14. 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 Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, vol. 51, iss. 10–11, pp. 1063–1091. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.10.009>
  15. Lindemann C., St. John M. A. A seasonal diary of phytoplankton in the North Atlantic. *Frontiers in Marine Science*, 2014, vol. 1, article 37 (6 p.). <https://doi.org/10.3389/fmars.2014.00037>
  16. Mikaelyan A. S., Chasovnikov V. K., Kubryakov A. A., Stanichny S. V. Phenology and drivers of the winter-spring phytoplankton bloom in the open Black Sea: The application of Sverdrup's hypothesis and its refinements. *Progress in Oceanography*, 2017, vol. 151, pp. 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.12.006>
  17. Mikaelyan A. S., Shapiro G. I., Chasovnikov V. K., Wobus F., Zanicchi M. Drivers of the autumn phytoplankton development in the open Black Sea. *Journal of Marine Systems*, 2017, vol. 174, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.05.006>
  18. Oğuz T., Ducklow H. W., Malanotte-Rizzoli P., Murray J. W., Shushkina E. A., Vedernikov V. I., Unluata U. A physical-biochemical model of



- plankton productivity and nitrogen cycling in the Black Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1999, vol. 46, iss. 4, pp. 597–636. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00074-0)
19. Oğuz T., Ducklow H., Malanotte-Rizzoli P., Tugrul S., Nezlin N.P., Unluata U. Simulation of annual plankton productivity cycle in the Black Sea by a one-dimensional physical-biological model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1996, vol. 101, iss. C7, pp. 16585–16599. <https://doi.org/10.1029/96JC00831>
  20. Oğuz T., Velikova V., Cociasu A., Korchenko A. The state of eutrophication. In: *State of the Environment of the Black Sea (2001–2006/7)*. Black Sea Commission Publications (BSC) 2008-3 / T. Oğuz (Ed.). Istanbul, Turkey, 2008, vol. 3, pp. 44–70.
  21. O'Reilly J.E., Maritorea S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Garver S.A., Kahru M., McClain M. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, vol. 103, iss. C11, pp. 24937–24953. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>
  22. Stel'makh L.V., Babich I.I., Tugrul S., Moncheva S., Stefanova K. Phytoplankton growth rate and zooplankton grazing in the western part of the Black Sea in the autumn period. *Oceanology*, 2009, vol. 49, iss. 1, pp. 83–92. <http://dx.doi.org/10.1134/S000143700901010X>
  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. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>
  24. Yunev O.A., Vedernikov V.I., Basturk O., Yilmaz A., Kideys A.E., Moncheva S., Kononov S.K. Long-term variations of surface chlorophyll *a* and primary production in the open Black Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, vol. 230, pp. 11–28. <http://dx.doi.org/10.3354/meps230011>

## DYNAMICS OF CHLOROPHYLL A CONCENTRATION IN THE BLACK SEA ON SATELLITE DATA

**Z. Z. Finenko<sup>1</sup>, I. M. Mansurova<sup>1</sup>, and V. V. Suslin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation

<sup>2</sup>Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russian Federation

E-mail: [zosim\\_finenko@mail.ru](mailto:zosim_finenko@mail.ru)

The use of satellite data to study the chlorophyll *a* dynamics, in contrast to contact methods, allows carrying out large scale research with high frequency of measurements. Such observations were carried out in the Black Sea offshore and inshore areas from 1998 to 2015. They made it possible to estimate the annual and interannual chlorophyll *a* dynamics in the surface layer and to reveal the periodicity, intensity, and duration of mass development of algae. In the western and eastern cyclonic gyres as well as in the shelf zone off the Crimean and Caucasus coasts, annual chlorophyll dynamics had the same pattern as that repeating year after year. From August-September to April-May of the next year the variation of chlorophyll in most cases corresponded to normal distribution and had a form of a bell-shaped curve with maximum observed in December-January. During autumn period, the chlorophyll concentration gradually increased with water cooling and seasonal pycnoclyne weakening. In winter the chlorophyll concentration decreased due to increase of mixed layer depth. Spring phytoplankton intensive development was observed every year when convective mixing weakened and stability of water column increased.

**Keywords:** chlorophyll *a*, satellite data, Black Sea, phytoplankton