

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *A* С УЧЁТОМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ, ГИДРОХИМИЧЕСКИХ И ГИДРООПТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЧЁРНОГО МОРЯ ВЕСНОЙ 2021 г. *

Крашенинникова С. Б., Бабич С. А.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: svetlanabk@mail.ru

Аннотация: По данным 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий», в апреле — мае 2021 г. выявлены особенности пространственного распределения концентрации хлорофилла *a* ($C_{\text{хл}}$) с учётом гидрологических, гидрохимического и гидрооптического факторов среды в верхнем 50-метровом слое северо-восточной части Чёрного моря. Наибольшие средние значения $C_{\text{хл}}$ ($2,3 \pm 0,7$ мкг/л) наблюдались в слое 0–20 м и наименьшие ($0,6 \pm 0,3$ мкг/л) — на глубине 50 м в районе Южного берега Крыма (ЮБК) и Кавказа. В районах с максимальными $C_{\text{хл}}$ выявлены высокие значения температуры воды ($13,3 \pm 0,6$ °С), концентрации кислорода ($7,5 \pm 0,1$ мкг/кг) при низких значениях солёности ($18,4 \pm 0,1$ епс) в прибрежных районах, что подтвердилось корреляционным анализом. Установлены значимые положительные связи концентрации хлорофилла *a* с температурой ($r = 0,8$), кислородом ($r = 0,5$), мутностью ($r = 0,9$) и отрицательные — с солёностью ($r = -0,6$) в слое 20 м в районе Кавказа. Аналогичные связи установлены на глубине 50 м в районе ЮБК. Наибольшие значения $C_{\text{хл}}$ в районах с высокой концентрацией кислорода свидетельствуют о скоплении в них фитопланктона, который выделяет кислород в процессе фотосинтеза. Высокие значения мутности свидетельствуют о наличии взвеси в этих районах. В апреле 2021 г., после тёплой зимы, наблюдались низкие значения $C_{\text{хл}}$, что подтвердилось данными спутниковых наблюдений. Максимум $C_{\text{хл}}$, наблюдающийся в глубоководной части моря, территориально совпал с минимумом температуры, максимумом солёности, что связано с подъёмом вод из более глубоководных слоёв к поверхности за счёт экмановской накачки. Основное черноморское течение имело зональную направленность с двумя максимумами скорости течений (3,5 см/с вблизи ЮБК и 2,5 см/с вблизи Кавказа). Поверхностная циркуляция вод объясняет наибольшую площадь распределения хлорофилла *a* с концентрацией более 2,5 мкг/л в западной части района исследования.

Ключевые слова: температура, солёность, Основное черноморское течение, мутность, кислород.

Введение

Исследование фитопланктона в весенний период имеет важное значение для изучения особенностей его годовой динамики и функционирования экосистемы Чёрного моря в целом [Финенко и др., 2021; Финенко и др., 2006; Silkin et al., 2019; Mikaelyan, Zatsepin, Chasovnikov, 2013]. Изменчивость биомассы фитопланктона оценивается по концентрации основного пигмента — хлорофилла *a*. Анализ пространственно-временного распределения концентрации хлорофилла *a* важен из-за быстрой реакции фитопланктонных сообществ на малейшие изменения климата или хозяйственной деятельности человека в Черноморском регионе. Такой анализ обычно проводится на основе данных контактных наблюдений [Юнев, 2011; Востоков и др., 2019; Финенко и др., 2021], спутникового зондирования [Чурилова и др., 2016; Chu, Ivanov, Margolina, 2005; Finenko, Suslin, Kovaleva, 2014].

*Работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом», № гос. регистрации 121041400077-1.

Из-за сильной соленосной стратификации в Чёрном море глубина максимального перемешивания в среднем составляет ~ 50 м, то есть совпадает с нижней границей эвфотического слоя, в котором освещённости достаточно для деления клеток фитопланктона [Кривенко, Пархоменко, 2010]. То есть сильная стратификация является препятствием для перемешивания вод между слоями, в результате обилие питательных веществ (азотных, фосфорных соединений и др.) концентрируется в эвфотической зоне, способствуя вегетации фитопланктона [Oguz et al., 1999; Yunev, Moncheva, Carstensen, 2005].

Весной до глубины 50 м распространяется концентрация хлорофилла *a* с глубиной залегания максимума $S_{\text{хл}}$ ~ 20 м [Chu, Ivanov, Margolina, 2005]. Положение максимума $S_{\text{хл}}$ не всегда совпадает с градиентами температуры и плотности [Финенко и др., 2021]. Индикатором положения максимума $S_{\text{хл}}$ может служить такой параметр, как мутность, характеризующийся уменьшением прозрачности воды в связи с наличием неорганических и органических тонкодисперсных взвесей, а также развитием планктонных организмов.

За период апрель — май 2021 г. на научно-исследовательском судне (НИС) «Профессор Водяницкий» (116-й рейс) сотрудниками Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ) были проведены натурные исследования в северо-восточной части Чёрного моря. В ходе экспедиции были получены новые данные о распределении $S_{\text{хл}}$, мутности, кислорода в комплексе с гидрологическими характеристиками (температурой, солёностью, течениями).

Цель работы — выявить особенности пространственного распределения концентрации хлорофилла *a* с учётом гидрологических, гидрохимического и гидрооптического факторов среды в верхнем 50-метровом слое северо-восточной части Чёрного моря в апреле — мае 2021 г.

Материалы и методы

В работе использовались данные о температуре и солёности воды, мутности, концентрации кислорода и хлорофилла *a* в верхнем 50-метровом слое северо-восточной части Чёрного моря в ходе 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (22 апреля — 15 мая 2021 г.). Глубину взятия проб батометрами на поверхности моря принимали за 0 м. Эвфотический слой в мезотрофных водах Чёрного моря доходит до 20 м, в отдельные годы на глубине 10 м часто встречаются максимумы $S_{\text{хл}}$. Пик фотосинтеза в Чёрном море находится в слое 10–20 м, так как усвояемость света на этих глубинах максимальная. В олиготрофных водах глубина фотического слоя ~ 50 м, поэтому анализ распределения всех параметров проводился на горизонтах 0, 10, 20, 50 м.

Эти данные были получены на борту судна прибором *Idronaut Ocean Seven 320+* [Ocean Seven ...] на стандартной мониторинговой сетке станций (рис. 1). В ходе экспедиции было выполнено 126 станций.

Скорости течений на поверхности рассчитывались по геострофическому соотношению относительно глубины 300 м.

Восстановление полей температуры, солёности, скоростей течений, концентрации хлорофилла *a* и мутности производилось методом интерполяции (кригинга) [Демьянов, Савельева, 2010].

Рассчитывались коэффициенты корреляции для поиска связей между биологическими и гидрохимическими параметрами на разных глубинах в районах Чёрного моря с наибольшей концентрацией хлорофилла *a*. Значимость коэффициентов корреляции оценивалась по *t*-критерию Стьюдента [Russo, 2004].

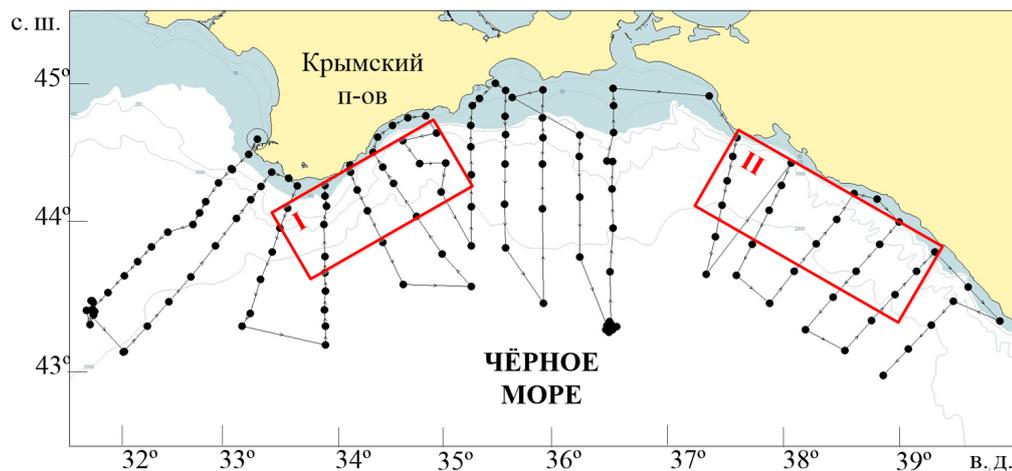


Рис. 1. Сетка станций по данным 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» за период 22 апреля — 15 мая 2021 г.,
I — район Южного берега Крыма (ЮБК), II — район побережья Кавказа

Результаты

Весной концентрация хлорофилла *a* имела неоднородное пространственное распределение (рис. 2). Наибольшие значения S_{chl} обнаружены вблизи Кавказского побережья (4,5 мкг/л) и в районе Южного берега Крыма (3 мкг/л) на горизонтах 0, 10, 20 м, а также в глубоководной части Чёрного моря (2,5 мкг/л). Площадь зоны, занимаемой хлорофиллом *a* (> 2,5 мкг/л), была максимальной в западной части района исследования.

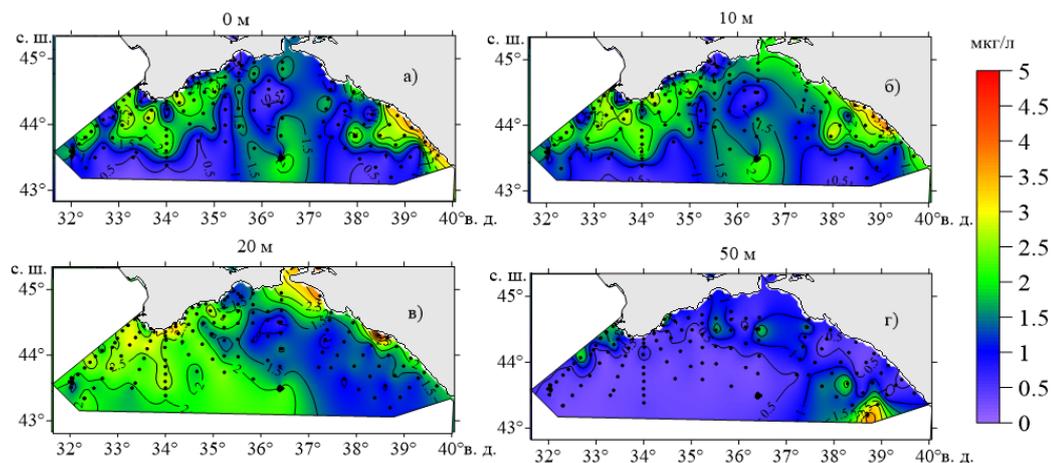


Рис. 2. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* на горизонтах 0, 10, 20, 50 м в северо-восточной части Чёрного моря за период 22 апреля — 15 мая 2021 г.; чёрные точки — сетка станций

Температура воды в восточной части Чёрного моря уменьшалась с глубиной от 15,2 °С (0 м) до 8,4 °С (50 м) (рис. 3). На горизонтах 0, 10 м наибольшие значения температуры воды наблюдались в прибрежье Кавказа (рис. 3а).

В районе Южного берега Крыма (ЮБК) в слое 0–10 м значения температуры воды были минимальными (11,6 °С). На горизонте 20 м площадь с преобладанием низких значений температуры расширилась от прибрежья до глубоководной части акватории, преимущественно в западной части моря и прибрежье Кавказа. На глубине 50 м температура воды по всей акватории не превышала 8,4 °С, лишь в прибрежье ЮБК она достигала 10 °С.

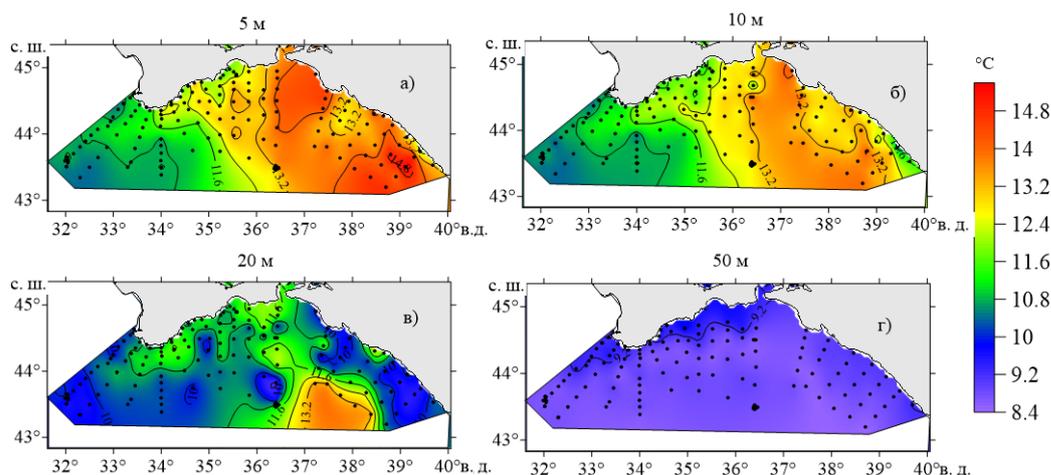


Рис. 3. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* на горизонтах 0, 10, 20, 50 м в северо-восточной части Чёрного моря за период 22 апреля — 15 мая 2021 г.; чёрные точки — сетка станций

Пространственное распределение солёности характеризовалось наименьшими её значениями (17,5 и 17,8 епс) в прибрежье Крыма и Кавказа, наибольшими (18,8 и 20,5 епс) — в глубоководной части Чёрного моря, на горизонтах 0 и 50 м соответственно (рис. 4а, 4б).

Концентрация кислорода распределена равномерно по всей исследуемой акватории в верхнем (0–20 м) слое, её значение равно 8 мкг/кг (рис. 4в). На горизонте 50 м наблюдается уменьшение содержания кислорода в центральной глубоководной части моря исследуемого района до нуля (рис. 4г), что свидетельствует о нахождении здесь границы бескислородной зоны.

Наибольшие значения мутности (1,5–2,0 емф) наблюдались вдоль Кавказского побережья в поверхностном слое, на горизонте 0 м (рис. 4д). На горизонтах 20 и 50 м значения показателя мутности приближались к нулю (рис. 4е), что свидетельствует о практически полном отсутствии взвешенного вещества.

Распределение скорости течений (рис. 5) имеет циклонический характер с выраженным основным звеном черноморской циркуляции — Основным черноморским течением (ОЧТ) — с максимальной скоростью 35 см/с вблизи ЮБК и 25 см/с в восточной части моря, что свидетельствует о разделении ОЧТ на восточную и западную части весной 2021 г. Ближе к центральной глубоководной части Чёрного моря скорости обеих частей течения малы (до 5 см/с).

В таблице представлены средние значения $C_{\text{хл}}$, температуры, солёности, содержания кислорода и их среднеквадратические отклонения для двух районов — Южного берега Крыма и Кавказа, где были выявлены максимальные значения концентрации хлорофилла *a* (рис. 2а).

Таблица 1

Средние значения параметров среды и их среднеквадратические отклонения в исследуемых районах (Южный берег Крыма и Кавказ)

Глубина, м	ЮБК				Кавказ			
	$C_{\text{хл}}$, мкг/л	T, °C	S, епс	O ₂ , мкг/кг	$C_{\text{хл}}$, мкг/л	T, °C	S, епс	O ₂ , мкг/кг
0	1,9 ± 0,9	11,7 ± 0,6	18,4 ± 0,1	7,8 ± 0,1	2,2 ± 1,1	13,3 ± 0,6	18,1 ± 0,2	7,5 ± 0,1
10	2,1 ± 0,8	11,5 ± 0,5	18,4 ± 0,1	7,8 ± 0,1	2,4 ± 0,9	12,7 ± 0,7	18,2 ± 0,2	7,6 ± 0,1
20	2,7 ± 0,5	11,3 ± 0,4	18,5 ± 0,1	7,8 ± 0,1	1,9 ± 1,0	10,3 ± 0,9	18,5 ± 0,2	7,6 ± 0,1
50	0,6 ± 0,5	9,1 ± 0,2	18,8 ± 0,2	7,2 ± 0,5	0,5 ± 0,2	8,9 ± 0,1	18,7 ± 0,1	7,4 ± 0,1

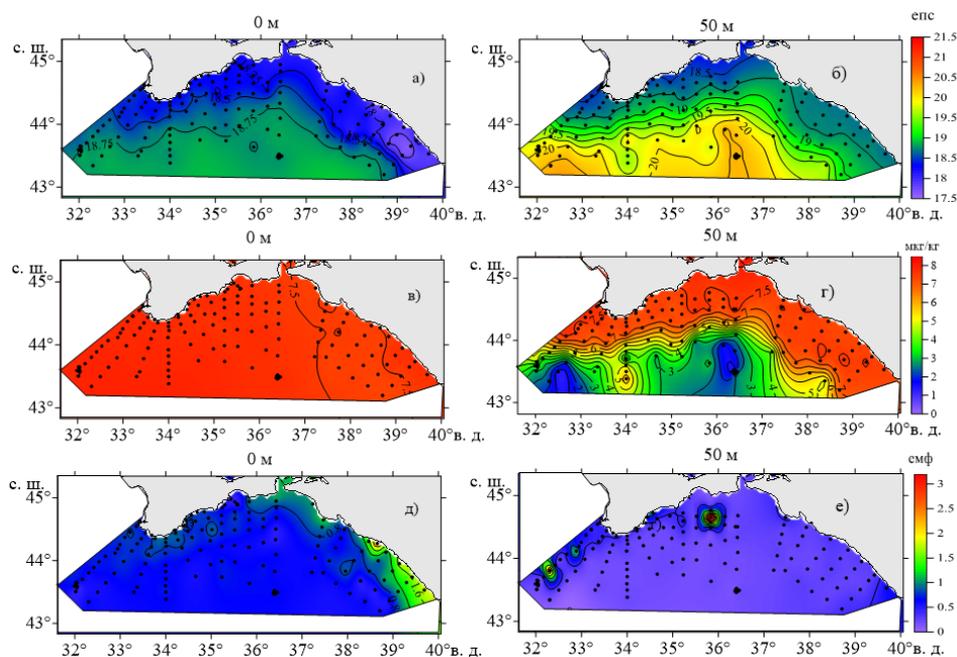


Рис. 4. Пространственное распределение солёности (а, б), концентрации кислорода (в, г) и мутности (д, е) на горизонтах 0 и 50 м в северо-восточной части Чёрного моря за период 22 апреля — 15 мая 2021 г.; чёрные точки — сетка станций

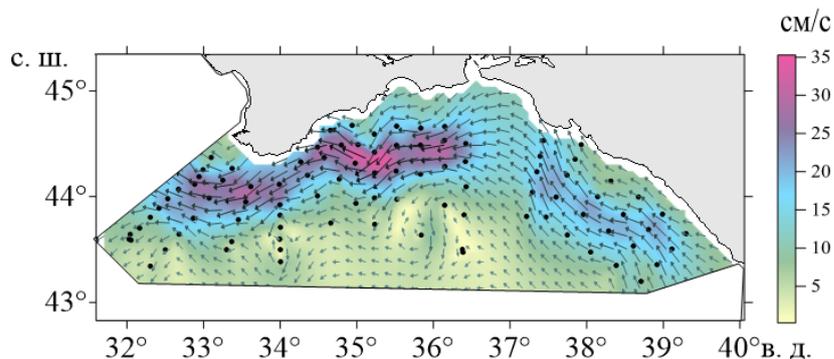


Рис. 5. Пространственное распределение геострофической скорости течений относительно отсчётной поверхности 300 м в северо-восточной части Чёрного моря за период 22 апреля — 15 мая 2021 г.; чёрные точки — сетка станций

В районе ЮБК установлены значимые на 5%-ном доверительном уровне положительные связи концентрации хлорофилла *a* с температурой ($r = 0,7$), кислородом ($r = 0,5$), мутностью ($r = 0,6$) и отрицательные — с солёностью ($r = -0,5$) на глубине 50 м. В районе Кавказа аналогичные связи $S_{хл}$ установлены с температурой ($r = 0,8$) и солёностью ($r < -0,6$) на глубине 20 м, с кислородом ($r = 0,5$) и мутностью ($r = 0,9$) — на поверхности. Положительная связь $S_{хл}$ с температурой характеризуется цветением теплолюбивых видов фитопланктона в весенний период. Отрицательная связь концентрации хлорофилла *a* с солёностью обусловлена большими значениями $S_{хл}$ ($> 4,5$ мкг/л) при распреснении прибрежных вод Крыма и Кавказа (рис. 4а, 4б), связанном с возможным обильным поступлением биогенных элементов со стоком рек. Значимые положительные связи $S_{хл}$ с концентрацией O_2 указывают на высокое содержание фитопланктона в двух рассматриваемых районах, так как в процессе фотосинтеза фитопланктон выделяет кислород. Положительные связи $S_{хл}$ с мутностью могут быть обусловлены преобладанием в воде примесей органического происхождения и развитием фитопланктона.

Обсуждение

Концентрация хлорофилла a соотносится с первичной продукцией в разных районах Мирового океана [Шемшура и др., 1990]. Поэтому $C_{\text{хл}}$ анализировалась как показатель потенциала фотосинтеза для данного района Чёрного моря. Полученное в настоящей работе пространственное распределение концентрации хлорофилла a с максимумом вблизи Кавказского побережья хорошо согласуется с имеющимися представлениями о распределении биомассы фитопланктона, связанном с $C_{\text{хл}}$ в эвфотическом слое весной [Крашенинникова и др., 2019]. Развитие фитопланктона зависит от освещённости и наличия биогенных элементов. На наличие или отсутствие биогенных элементов могут указывать гидрометеорологические особенности района исследования.

Одним из основных факторов, обуславливающих максимум $C_{\text{хл}}$ в глубоководной части Чёрного моря в весенний период, является подъём биогенных элементов к поверхности за счёт экмановской накачки, обусловленной неоднородностью поля ветра [Krasheninnikova et al., 2022]. При этом хочется отметить, что в весенний период $C_{\text{хл}}$ ниже, чем летом, что связано с более низкими значениями экмановской скорости в весенний сезон, чем в летний.

В работе [Silkin et al., 2019] также указывается на то, что существует тесная связь между доминирующими видами фитопланктона и концентрацией питательных веществ, зависящей от направления ветра. Хочется отметить, что в марте — апреле в период 2016–2019 гг. в шельфовой зоне Чёрного моря доминировали разные виды водорослей: динофитовые, диатомовые, гаптофитовые, примнезиевые [Ли и др., 2021; Финенко и др., 2021]. Именно эти водоросли обуславливают рост первичной продукции в рассматриваемом регионе весной.

Солёность воды увеличивается от побережья к центральным районам Чёрного моря, что сопоставимо с общим распределением солёности, полученным по результатам экспериментальных и теоретических исследований в ранних работах, например [Комплексные океанографические ... , 1980]. С речным стоком и переносом пресных вод Основным черноморским течением связано относительно низкое содержание солей в поверхностном слое прибрежной зоны [Кордзадзе, Деметрашвили, Сурмава, 2004], что подтверждается результатами настоящей работы. Изолированные объёмы пресной воды в поверхностном слое наблюдаются вблизи устьев рек в периоды паводков, где также наблюдались максимальные значения концентрации хлорофилла a .

Район повышенной солёности находился в центре циклонического круговорота, образованного ОЧТ, где происходил вынос солёных вод основного галоклина в поверхностный слой. Аналогичные процессы происходили при событиях локальных апвеллингов в прибрежной зоне. В частности, как показано в настоящей работе, вблизи Кавказского побережья, в районе резкого понижения температуры на ~ 4 °С (рис. 2в), солёность повышается в среднем на 0,5 епс. Аналогичные выводы для района ЮБК сделаны в работе [Горячкин, Иванов, 2005], в которой установлено, что увеличение солёности составило 0,2–1,5 епс. Сезонный галоклин хорошо выражен в апреле — мае, что согласуется с данными, представленными в работе [Иванов, Белокопытов, 2011].

Сравнение полученных в настоящей работе данных контактных наблюдений за концентрацией хлорофилла a и спутниковых данных *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer-Aqua* (*MODIS-Aqua*) (рис. 2а, 6а) показало, что в районе Кавказского побережья действительно наблюдалось наибольшее значение концентрации хлорофилла a (5 мкг/л), у южной части побережья Крыма значение составило 1,5 мкг/л. Получено, что концентрация хлорофилла a весной 2021 г. оказалась невысокой (~ 2 мкг/л), это подтверждается данными спутниковых наблюдений (рис. 6а). После тёплой зимы $C_{\text{хл}}$ в весенний период должна быть в 3–5 раз ниже по сравнению с более холодными зимами [Finenko, Suslin, Kovaleva, 2014]. В январе 2021 г. температура поверхности Чёрного моря равнялась 10–14 °С (зима тёплая) (рис. 6б), при этом наблюдались низкие значения $C_{\text{хл}}$

в апреле 2021 г. Температура менее 8–10 °С (зима холодная) (рис. 6г) сопровождалась троекратно увеличивающимися значениями $C_{\text{хл}}$ (рис. 6в) в северо-восточной части Чёрного моря в апреле 2012 г. Согласно проведённому сравнению, весной 2012 г. был зафиксирован апвеллинг, характеризующийся меньшими значениями температуры и приводящий к поднятию на поверхность вод из более глубоководных слоёв, богатых биогенными элементами и, соответственно, высокими значениями $C_{\text{хл}}$, в северо-восточной части Чёрного моря (рис. 6в).

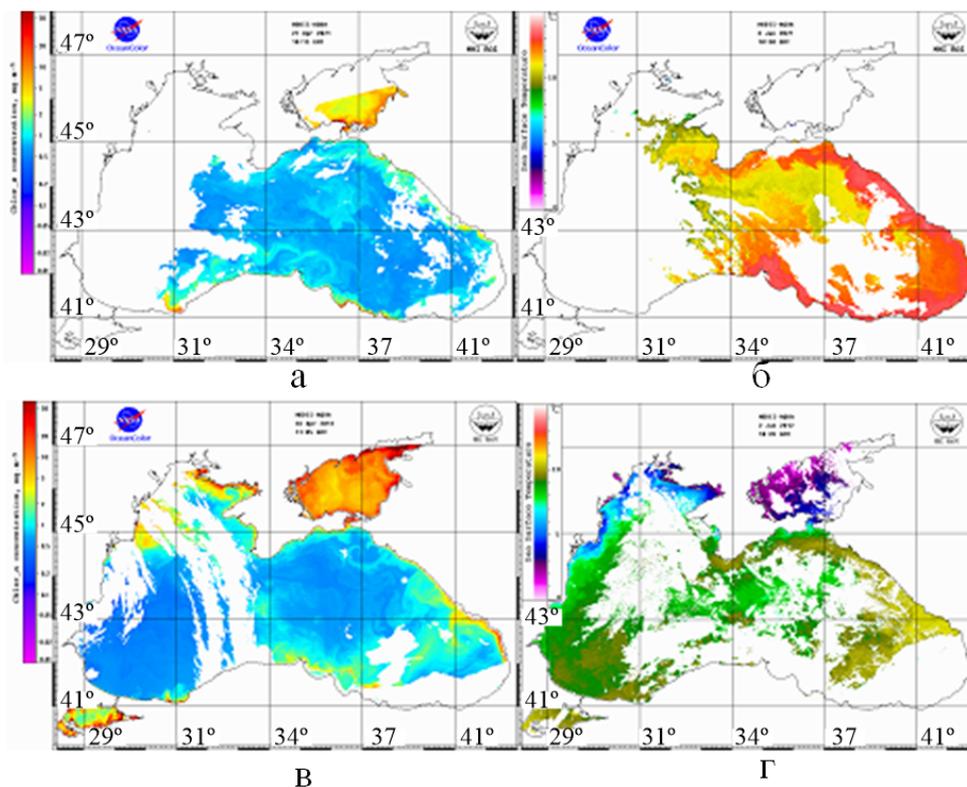


Рис. 6. Распределение концентрации хлорофилла *a* (согласно спутниковым данным *MODIS-Aqua* [NRT satellite..., 2002]): (а) — 27 апреля 2021 г., (в) — 26 апреля 2012 г.; распределение температуры поверхности: (б) — 3 января 2021 г., (г) — 3 января 2012 г.

Заключение

В ходе 116-го рейса на НИС «Профессор Водяницкий» в апреле — мае 2021 г. были выявлены особенности пространственного распределения концентрации хлорофилла *a* с учётом распределения температуры и солёности воды, скорости течений, концентрации кислорода, мутности в эвфотическом слое (50 м) северо-восточной части Чёрного моря.

Концентрация хлорофилла *a* достигала наибольших значений вблизи Кавказского побережья и в районе Южного берега Крыма (4,5 мкг/л) на горизонтах 0, 10, 20 м. Максимумы $C_{\text{хл}}$ территориально совпадали с наибольшими значениями концентрации кислорода, мутности и наименьшими значениями солёности. Максимумы кислорода, по-видимому, связаны с наибольшим содержанием фитопланктона в этих двух районах. Наибольшие значения мутности обусловлены наличием взвеси различного происхождения. Обнаружены максимальные значения температуры (15 °С) в поверхностном слое моря, постепенно уменьшающиеся с глубиной, при распреснении вод вблизи Кавказского побережья. Область повышенной солёности (более 18,8–20,5 епс) наблюдалась в центре циклонического круговорота глубоководной части, где происходил вынос солёных вод основного галоклина в поверхностный слой в Чёрном море.

Корреляционный анализ позволил установить значимые на 5%-ном доверительном уровне положительные связи концентрации хлорофилла *a* с температурой ($r > 0,7$), кислородом ($r = 0,5$), мутностью ($r > 0,6$), а также отрицательные — с солёностью ($r < -0,5$) на глубине 50 м в районе ЮБК и в слое 0–20 м в районе Кавказа. Выявленные связи в прибрежье Кавказа и ЮБК обусловлены доминированием динофитовых, диатомовых микроводорослей и эвтрофикацией вод за счёт стока рек в рассматриваемый период наблюдений. Максимум $C_{\text{хл}}$, наблюдающийся в глубоководной части моря, территориально совпадает с минимумами значений температуры и максимумами солёности, что связано с подъёмом вод из более глубоководных слоёв за счёт экмановской накачки.

Наименьшие значения концентрации хлорофилла *a* весной вблизи северо-восточного побережья Чёрного моря наблюдаются после тёплой зимы, наибольшие — после холодной. Это подтверждается также данными спутниковых наблюдений.

В поверхностной циркуляции вод в апреле — мае 2021 г. преобладал поток Основного черноморского течения, преимущественно зонального направления (с востока на запад), что, возможно, объясняет преобладание концентрации хлорофилла *a* со значениями более 2,5 мкг/л в западной части района исследования по сравнению с восточной.

Список литературы

1. Востоков С. В., Лобковский Л. И., Востокова А. С., Соловьев Д. М. Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Чёрном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла *a* // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 485, № 1. – С. 99–103. – <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485199-103>
2. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. Изменчивость солёности поверхностных вод в прибрежной зоне Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2005. – Вып. 12. – С. 21–27.
3. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. – Москва : Наука, 2010. – 327 с.
4. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Чёрного моря / Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины. – Севастополь : МГИ, 2011. – 209 с.
5. Комплексные океанографические исследования Чёрного моря / В. В. Ефимов [и др.] ; отв. ред. Б. А. Нелепо. – Киев : Наук. думка, 1980. – 240 с.
6. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И., Сурмава А. А. О реакции гидрологического режима Чёрного моря на изменчивость атмосферных процессов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2004. – Вып. 10. – С. 265–277.
7. Крашенинникова С. Б., Минкина Н. И., Самышев Э. З., Шокурова И. Г. Влияние комплекса факторов среды на биомассу фитопланктона и зоопланктона в Чёрном море в весенний период // Экология и строительство. – 2019. – № 4. – С. 14–21. – <https://doi.org/10.35688/2413-8452-2019-04-002>
8. Кривенко О. В., Пархоменко А. В. Пространственная и временная изменчивость биомассы фитопланктона в Чёрном море за период 1948–2001 гг. // Морской экологический журнал. – 2010. – Т. 9, № 4. – С. 5–24.
9. Ли Р. И., Сысоева И. В., Сысоев А. А., Латушкин А. А. Структура фитопланктона Чёрного моря в весенний период // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность : междунар. науч. конф., посвящ. 150-летию Севастоп. биол. станции – Ин-та биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского и 45-летию НИС «Профессор Водяницкий», 13–18 сент. 2021 г., Севастополь, Рос. Федерация : тез. докл. – Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2021. – С. 281–282. – URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/10548> (дата обращения: 01.03.2022).

10. Финенко З. З., Масурова И. М., Ковалева И. В., Георгиева Е. Ю. Развитие фитопланктона в зимне-весенний период в прибрежных водах Крыма // Морской биологический журнал. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 102–114. – <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.1.08>
11. Финенко Г. А., Романова З. А., Аболмасова Г. И., Аннинский Б. Е. Трофические взаимоотношения в планктонном сообществе Чёрного моря на современном этапе // Экология моря : сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь : ИнБЮМ, 2006. – Т. 71. – С. 50–54.
12. Чурилова Т. Я., Суслин В. В., Кривенко О. В., Ефимова Т. В., Моисеева Н. А. Спектральный подход к оценке скорости фотосинтеза фитопланктона в Чёрном море по спутниковой информации: методологические аспекты развития региональной модели // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 367–384. – <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-4-367-384>
13. Шемшур В. Е., Финенко З. З., Буракова З. П., Крупаткина Д. К. Оценка первичной продукции морского фитопланктона по хлорофиллу «а», относительной прозрачности и спектрам восходящего излучения // Океанология. – 1990. – Т. 30, № 3. – С. 479–485.
14. Юнев О. А. Эвтрофикация и годовая первичная продукция фитопланктона глубоководной части Чёрного моря // Океанология. – 2011. – Т. 51, № 4. – С. 658–668.
15. Chu P. C., Ivanov L. M., Margolina T. M. Seasonal variability of the Black Sea chlorophyll-a concentration // Journal of Marine Systems. – 2005. – Vol. 56, iss. 3/4. – P. 243–261. – <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.01.001>
16. 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. – P. 596–605. – <https://doi.org/10.1134/S0001437014050063>
17. Krasheninnikova S. B., Minkina N. I., Shokurova I. G., Samyshev E. Z. Comprehensive analysis of the distribution of ecosystem components in the Black Sea taking into account hydrochemical and hydrometeorological factors // Water Resources. – 2022. – Vol. 49, iss. 1. – P. 134–141. – <https://doi.org/10.1134/S0097807822010092>
18. Mikaelyan A. S., Zatsepin A. G., Chasovnikov V. K. Long-term changes in nutrient supply of phytoplankton growth in the Black Sea // Journal of Marine Systems. – 2013. – Vol. 117/118. – P. 53–64. – <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.02.012>
19. Ocean Seven 320 Plus WOCE-CTD // Indronaut : website. – Italy, [19??]. – URL: <https://www.idronaut.it/multiparameter-ctds/oceanographic-ctds/os320plus-oceanographic-ctd/> (date of access: 01.03.2022).
20. NRT satellite data // Marine portal : website / Marine Hydrophysical Institute of RAS. – Sevastopol, 2002. – URL: <http://dvs.net.ru/mp/data/modis/2105/210509lg.gif> (date of access: 01.03.2022).
21. Oguz T., Ducklow H. W., Malanotte-Rizzoli P., Murray J. W., Shushkina E. A., Vedernikov V. I., Ulnuata U. A physical-biochemical model of phytoplankton productivity and nitrogen cycling in the Black Sea // Deep Sea Research. Part I, Oceanographic. – 1999. – Vol. 46, iss. 4. – P. 597–636. – [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00074-0)
22. Russo R. Statistics for the behavioral sciences: an introduction. – [S. l.] : Taylor and Francis, 2004. – 256 p.
23. Silkin V. A., Pautova L. A., Giordano M., Chasovnikov V. K., Vostokov S. V., Podymov O. I., Pakhomova S. V., Moskalemko L. V. Drivers of phytoplankton blooms in the northeastern Black Sea // Marine Pollution Bulletin. – 2019. – Vol. 138. – P. 274–284. – <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.042>
24. Yunev O. A., Moncheva S., Carstensen J. Long-term variability of vertical chlorophyll a and nitrate profiles in the open Black Sea: eutrophication and climate change // Marine Ecology Progress Series. – 2005. – Vol. 294. – P. 95–107. – <https://doi.org/10.3354/meps294095>

**SPATIAL DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION
IN HYDROLOGICAL, HYDROCHEMICAL AND HYDROOPTICAL CONDITIONS
OF THE BLACK SEA IN SPRING 2021**

Krashennnikova S. B., Babich S. A.

*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: svetlanabk@mail.ru*

Abstract: According to the data of cruise 116 of the R/V «Professor Vodyanitsky» in April — May 2021, the features of the spatial distribution of the concentration of chlorophyll-a (C_{hl}) were analyzed, taking into account hydrological, hydrochemical and hydrooptical environmental factors in the upper 50-meter layer of the northeastern part of the Black Sea. The influence of hydrological and hydrooptical environmental factors on the spatial distribution of chlorophyll-a (C_{hl}) concentration in the upper 50-meter layer of the northeastern part of the Black Sea by the data of 116 cruise of the R/V «Professor Vodyanitsky» in April — May 2021, were analyzed. The highest mean values of C_{hl} $2,3 \pm 0,7 \mu\text{g/l}$ were observed in the 0–20 m layer and the lowest $0,6 \pm 0,3 \mu\text{g/l}$ at 50 m in the region of the Southern Coast of Crimea (South Coast) and the Caucasus. In areas with maximum C_{hl} , high values of water temperatures ($13,3 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$), oxygen concentrations ($7,5 \pm 0,1 \mu\text{g/kg}$) at low salinity values ($18,4 \pm 0,1 \text{ psu}$) were revealed, which was confirmed by correlation analysis. Significant positive relationships were established between the concentration of chlorophyll-a and temperature ($r = 0,8$), oxygen ($r = 0,5$), turbidity ($r = 0,9$) and negative — with salinity ($r = -0,6$) in the 20 m layer in the Caucasus region. Similar connections are established at 50 m in the South Coast region. The highest C_{hl} values in areas with high oxygen concentrations indicate the accumulation of phytoplankton in them, which releases oxygen during photosynthesis. High turbidity values characterize the presence of suspended matter in these areas. After a warm winter, low C_{hl} values were observed in April 2021, by satellite observations was confirmed. The C_{hl} maximum observed in the deep part of the sea coincided with the temperature minimum, salinity maximum, which is associated with the rise of water from deeper layers to the surface due to Ekman pumping. The Rim current had a zonal orientation with two current velocity maxima (3.5 cm/s) near the SCC and (2.5 cm/s) and Caucasus coast. The surface waters circulation explains the largest area of distribution of chlorophyll-a with concentration $> 2,5 \mu\text{g/l}$ in the western part of the investigation region.

Keywords: temperature, salinity, Rim Current, turbidity, oxygen.

Сведения об авторах

Крашенинникова Светлана Борисовна кандидат географических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», svetlanabk@mail.ru

Бабич Сергей Алексеевич ведущий инженер ЦКП НИС «Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», setronix@bk.ru

*Поступила в редакцию 16.03.2022 г.
Принята к публикации 12.09.2022 г.*