

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 504.064.37

Сезонная изменчивость основных оптически активных компонентов морской среды по данным дистанционного зондирования и моделирования

Т.Я. Шульга[✉], В.В. Суслин*

Морской гидрофизический институт РАН
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Поступила в редакцию 16.02.2024;
после доработки 03.05.2024;
принята к печати 20.05.2024

Представлены результаты апробации метода восстановления недостающих данных по спутниковым изображениям на основе результатов трехмерного гидродинамического моделирования. Метод протестирован на четырех основных биооптических параметрах: концентрация хлорофилла-*a* и феопигментов (TChl), показатель поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(678)$) и неживым органическим веществом ($a_{CDM}(438)$), показатель обратного рассеяния света ($b_{bp}(438)$). Результаты, полученные на основе объединенного продукта, сравнивались с наблюдениями *in situ*, выполненными в апреле-мае 2019 г. на НИС «Профессор Водяницкий». Отклонение TChl по данным MODIS и моделирования относительно наблюдений *in situ* составило 1,8 и 2,2 мг · м⁻³ соответственно. Анализ среднесуточных значений биооптических параметров, полученных при регулярном усвоении данных MODIS в гидродинамическую модель, позволил отследить их сезонные изменения в центральной части бассейна Азовского моря. Среди исследуемых биооптических параметров выделяется четкая сезонная изменчивость TChl при среднегодовом значении $2,98 \pm 1,22$ мг · м⁻³. Изменения $a_{CDM}(438)$ и $b_{bp}(438)$ характеризуются двумя периодами наибольших значений: весенним (с марта по май) и осенним (с августа по октябрь), с соответствующими среднегодовыми $0,42 \pm 0,15$ и $0,10 \pm 0,03$ м⁻¹. Максимумы изменений $a_{ph}(678)$ отмечаются с июля по октябрь при среднегодовом $0,04 \pm 0,03$ м⁻¹. Предложенный метод использует преимущества данных дистанционного зондирования, расширяющих возможности оперативного океанологического мониторинга, и моделирования, позволяющих заполнить информационные пропуски. Полученные результаты обеспечивают полные непрерывные наборы данных о распределении основных биооптических показателей, имеющие решающее значение при прогнозировании экологического состояния морских бассейнов.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, MODIS, гидродинамическое трехмерное моделирование, усвоение данных, биооптические параметры, Азовское море; ocean color dataset, MODIS, hydrodynamic three-dimensional simulation, data assimilation, bio-optical parameters, the Sea of Azov.

Введение

Антропогенное воздействие на морские водоемы приводит к таким последствиям, как появление дополнительных биогенов, вредоносное цветение водорослей и морфологические изменения, которые влияют на экологическую целостность и качество воды в море. Выявление ухудшения или улучшения экологического состояния морских бассейнов требует регулярного мониторинга и анализа биооптических показателей, реагирующих на изменения, происходящие в морской среде. Основным показателем, предоставляющим информацию о биологическом состоянии морской воды, является концентрация хлорофилла-*a*, содержащегося в фитопланктоне. Оптически активными компонентами, определя-

ющими цвет морской воды, являются общее взвешенное вещество и окрашенное растворенное органическое вещество. Эти биооптические компоненты могут быть получены из стандартных спутниковых продуктов, предоставляющих регулярные данные, охватывающие морские акватории. Результаты спутникового зондирования и политика бесплатного использования изображений позволяют значительно расширить объем информации как для изучения океанографических процессов, так и для экологического мониторинга морских экосистем [1–3]. Однако существенным недостатком использования спутниковых данных, с одной стороны, является наличие пропусков, вызванных общими проблемами дистанционного зондирования (например, облачность). С другой стороны, существует проблема искажений модельных прогнозов, особенно в динамичных прибрежных зонах. Обобщение результатов численного моделирования и данных дистанционного

* Татьяна Яковлевна Шульга (shulgary@mail.ru);
Вячеслав Владимирович Суслин (slava.suslin@mhi-ras.ru).

зондирования помогает уменьшить проблемы источников этой информации и обеспечивает более точное и регулярное прогнозирование состояния морской воды [1, 3, 4].

Цель нашей работы, продолжающей исследования [3, 4], — анализ сезонной изменчивости основных биооптических показателей, полученных по результатам трехмерного гидродинамического моделирования POM (Princeton Ocean Model, <http://ccro.odu.edu/POMWEB>). Настоящее исследование выполнено с использованием улучшенных процедур оперативного усвоения данных спутниковых наблюдений моделью POM.

Методы и данные

Район исследования — мелководное Азовское море, связанное с Черным морем узким Керченским проливом, обуславливающим практически полную замкнутость бассейна. Биологическая продуктивность Азовского моря характеризуется большой межгодовой, сезонной и пространственной изменчивостью, связанной с резким горизонтальным градиентом, обусловленным притоком соленых и пресных вод. Основные источники пресных вод (реки Дон и Кубань) расположены в северо-восточной и юго-восточной частях Азовского моря, а соленых — в южной (Керченский пролив) и западной (Генический пролив) частях моря (рис. 1). Режимы стока рек Дон (в марте — июне) и Кубань (в апреле — июле) в сезоны продолжительных весенне-летних паводков в два раза больше, чем в остальное время года [5, 6]. Эта изменчивость послужила одной из причин выделения субрегионов по акватории Азовского моря (рис. 1).



Рис. 1. Карта Азовского моря с границами субрегионов (AZ1–AZ3). Расположение станций 1–4, выполнявших прямые измерения биооптических показателей в Азовском море в 106-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» 19.04–10.05.2019 г.

Также мотивацией к разделению Азовского моря на субрегионы явилось использование биооптического регионального алгоритма для расчета параметров IOPs (Inherent Optical Properties) [7, 8], настроенного корректным образом только для цен-

тральной части моря (AZ2, рис. 1). Другая причина — особенность геоморфологического строения Азовского моря, а именно высокая неоднородность его рельефа в районах кос, проливов, эстуариев и заливов по сравнению с более глубокими участками центральной части моря [9]. Таким образом, район исследования разделен на субрегионы: мелководная часть — Таганрогский залив (AZ1: 37,7–39,3° в.д.; 46,7–47,3° с.ш.) с глубинами не более 4 м; центральная часть моря (AZ2) с максимальной глубиной ~14 м; глубоководная часть с глубиной ~200 м (AZ3: 35,3–37,6° в.д.; 45–45,5° с.ш.). Кроме горизонтального деления на субрегионы исследуемый бассейн поделен по вертикали на поверхностный, средний и глубоководный слои. Такое разграничение необходимо для корректного усвоения спутниковых данных моделью POM, использования биооптического регионального алгоритма для расчета параметров IOPs и верификации результатов по наблюдениям *in situ*.

Спутниковые продукты. В настоящей работе использованы стандартные продукты MODIS-Aqua/Terra (R2018), доступные на открытом ресурсе oceancolor.gsfc.nasa.gov [10, 11]. Коэффициенты яркости моря в оптическом диапазоне за 2019 г. с километровым пространственным разрешением были отбракованы по критериям, предложенным в [12], и объединены в общий массив спутниковых данных, интерполированных затем на модельную сетку Азовского моря (396 × 295 узлов) с разрешением 0,8° с.ш. × 1,1° в.д. Разрешение спутниковых измерений по времени обусловлено ежедневным прохождением спутника над районом Азовского моря с 09:00 до 14:00 по местному времени.

Трехмерное моделирование. Численный анализ основан на применении трехмерной нелинейной гидродинамической модели океана POM с граничными условиями на свободной поверхности, задающимися ежечасно по данным атмосферной модели SKIRON (forecast.uoa.gr) с пространственным разрешением 0,1°, интерполированным на сетку Азовского моря. Модельная сетка бассейна с горизонтальным разрешением ~1 км охватывает акваторию Азовского моря, Керченского пролива и прилегающей части Черного моря (44,81345–47,43767° с.ш. и 34,42559–39,36995° в.д.) и разделена по вертикали 11 сигма-уровнями, хорошо описывающими неоднородности рельефа дна. Моделирование выполнено в течение 365 сут с 01.01 по 31.12.2019 г.

Региональный биооптический алгоритм для дистанционной оценки IOPs Азовского моря. Исследованы следующие биооптические параметры, которые являются маркерами живого и неживого органического вещества в морской воде: показатель поглощения света фитопланктоном на длине волны 678 нм ($a_{ph}(678)$, m^{-1}); суммарная концентрация хлорофилла-*a* и феофитина TChl ($mg \cdot m^{-3}$); показатель поглощения света окрашенным органическим веществом на длине волны 438 нм ($a_{CDM}(438)$, m^{-1}) и показатель обратного рассеяния

света ($b_{bp}(438)$, m^{-1}). Значения биооптических показателей для Азовского моря получены на основании регионального биооптического алгоритма дистанционной оценки IOPs, изложенного в [8, 13].

Методология и алгоритм заполнения недостающей спутниковой информации в облачных районах результатами моделирования. Методология включает три основных этапа: 1) обработка изображений спектрорадиометра MODIS; 2) построение карт всех вышеперечисленных биооптических параметров; 3) 3D-моделирование POM с помощью усовершенствованных процедур усвоения данных дистанционного зондирования MODIS и метеорологических полей модели SKIRON.

Усвоение данных дистанционного зондирования гидродинамической моделью выполняется с использованием последовательного рекурсивного алгоритма, основанного на теории оптимальной фильтрации Калмана [14, 15], протестированного для Азовского моря при решении задачи эволюции пассивных трассеров [4]. Этот алгоритм оформлен в виде программного блока, дополняющего гидродинамическую модель POM. Для устранения разрывов, возникающих на границе данных зондирования и прогноза, процедура усвоения была дополнена новым блоком гидродинамической модели, обеспечивающим сглаживание данных. Новая разработанная процедура основана на алгоритме, заполняющем спутниковые данные в несколько этапов:

1. Устранение систематической ошибки для выравнивания распределения значений биооптического параметра на спутниковых картах и полученных по модели. Величина систематической ошибки в этих случаях разная, поэтому для каждой пары, участвующей в слиянии, рассчитывается средняя разница значений между спутниковой (P_{MODIS}) и модельной (P_{model}) картами: $\Delta = P_{MODIS} - P_{model}$. Карты P'_{MODIS} и P'_{model} создаются по следующим формулам:

$$P'_{MODIS} = P_{MODIS} + \alpha \cdot \Delta, \quad P'_{model} = P_{model} + (1 - \alpha) \cdot \Delta,$$

где $\alpha \in (0, 1)$ — параметр, определяющий метод выравнивания среднего: при $\alpha = 0$ биооптический параметр остается неизменным, при $\alpha = 1$ его среднее значение приравнивается к среднему по модели, при $\alpha = 0,5$ биооптический параметр по спутнику и модели увеличивается или уменьшается одновременно на одну и ту же величину ($1/2\Delta$).

2. Создание матрицы, содержащей веса (W), определяющие пропорции между модельной и спутниковой информацией при объединении. Облачным областям присвоен вес 0, в окрестности этих областей определяется район, где вес обратно пропорционален расстоянию от видимого на спутниковых картах края облаков. Областям, расположенным на расстоянии больше заданного буфера, присваивается значение 1.

3. Расчет полной карты биооптического параметра на поверхности моря выполняется по формуле

$$P = WP'_{MODIS} + (1 - W)P'_{model}.$$

Результаты и обсуждение

Карты основных оптически активных компонентов морской среды. Предлагаемый подход обеспечивает подробный долгосрочный анализ биооптических показателей, являющихся маркерами живого и неживого органического вещества в Азовском море. Результаты, полученные в рамках данного подхода, позволили построить ежечасные и непрерывные по пространству карты биооптических показателей и описать изменчивость оптических свойств Азовского моря. Созданы и проанализированы наборы данных, включающие итоги моделирования и зондирования основных биооптических параметров в Азовском море за 2019 г. В качестве примера на рис. 2 (цв. вставка) показаны карты распределения биооптических параметров $Tchl$, $a_{ph}(678)$, $b_{bp}(438)$ и $a_{CDM}(438)$ в поверхностном слое Азовского моря по данным MODIS и моделирования.

Оценка точности основных показателей оптически активных компонентов морской среды, полученных на основе данных дистанционного зондирования и моделирования, проводится путем их сравнения с наблюдаемыми *in situ*. Для этого используются данные прямых измерений биооптических показателей вод Азово-Черноморского бассейна, выполненных в 106-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» в апреле-мае 2019 г. [13].

Сопоставление значений биооптических параметров выполняется по трем источникам данных: (1) данные о коэффициентах яркости моря, полученные со спутников MODIS; (2) результаты моделирования POM с усвоением данных дистанционного зондирования; (3) данные измерений *in situ* на станциях 1–4 (см. рис. 1). Отметим, что источники (1) и (2) являются независимыми по отношению к (3).

В табл. 1 приведены средние, максимальные и минимальные значения с соответствующими стандартными отклонениями для трех биооптических параметров из источников данных (1)–(3) в апреле-мае 2019 г. Вычисление указанных метрик выполнялось по массивам данных дистанционного зондирования (1) и моделирования (2) в области с координатами, отличающимися не более чем на $0,01^\circ$ от координат станций судовых измерений (1–4 на рис. 1).

Из анализа данных, приведенных в табл. 1, следует, что наименьшее отклонение от наблюдений *in situ* имеет среднее значение показателя $Tchl$. Величина отклонения средних концентрации $Tchl$ по данным MODIS и моделирования относительно наблюдений *in situ* составила 1,8 и $2,2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Отметим, что максимальные концентрации $Tchl$ по данным MODIS ($7,7 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) и моделирования ($7,2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) не выходят за пределы максимумов, полученных по данным *in situ* ($8,8 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$).

Дальнейшее сравнение значений биооптических параметров, охватывающее 2019 г., проведено между выборками спутниковых (1) и модельных (2) данных с соответствующими объемами $2,2 \cdot 10^6$

Таблица 1

Средние значения и показатели вариации биооптических параметров по результатам моделирования, спутниковым данным и измерениям *in situ* в апреле-мае 2019 г.

Параметр	Среднее	Минимум	Максимум
<i>Данные MODIS-Aqua/Terra</i>			
TChl, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$	$4,30 \pm 1,20$	1,00	7,70
$a_{\text{CDM}}(438)$, м^{-1}	$1,01 \pm 0,13$	0,68	1,46
$a_{\text{ph}}(678)$, м^{-1}	$0,06 \pm 0,02$	0,01	0,12
<i>Результаты моделирования POM</i>			
TChl, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$	$4,00 \pm 0,80$	2,00	7,20
$a_{\text{CDM}}(438)$, м^{-1}	$0,20 \pm 0,27$	0,10	0,78
$a_{\text{ph}}(678)$, м^{-1}	$0,09 \pm 0,08$	0,04	0,26
<i>Результаты измерений in situ</i>			
TChl, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$	$6,20 \pm 1,30$	4,90	8,80
$a_{\text{CDM}}(438)$, м^{-1}	$0,31 \pm 0,06$		
$a_{\text{ph}}(678)$, м^{-1}	$0,08 \pm 0,03$		

и $5,9 \cdot 10^8$. Сопоставление между средними значениями биооптических параметров выполнено для AZ2. Как следует из табл. 2, отклонение средних значений биооптических параметров по наборам спутниковых данных превышает соответствующие средние по результатам моделирования. Одной из причин этого является наличие пропусков по времени и пространству в спутниковой информации, завышающих средние значения относительно наблюдаемых *in situ* (см. табл. 1).

Таблица 2

Средние значения и показатели вариации биооптических параметров по результатам моделирования и спутниковым данным за 2019 г.

Параметр	Среднее	Минимум	Максимум
<i>Данные MODIS</i>			
TChl, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$	$5,01 \pm 3,560$	0,56	17,78
$a_{\text{CDM}}(438)$, м^{-1}	$0,96 \pm 0,189$	0,18	1,70
$a_{\text{ph}}(678)$, м^{-1}	$0,11 \pm 0,080$	0,01	0,50
$b_{\text{bp}}(438)$, м^{-1}	$0,12 \pm 0,058$	0,01	0,45
<i>Результаты моделирования</i>			
TChl, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$	$2,98 \pm 1,220$	0,116	5,90
$a_{\text{CDM}}(438)$, м^{-1}	$0,42 \pm 0,150$	0,003	0,75
$a_{\text{ph}}(678)$, м^{-1}	$0,04 \pm 0,030$	0,002	0,16
$b_{\text{bp}}(438)$, м^{-1}	$0,10 \pm 0,030$	0,002	0,15

Величина отклонения средних концентрации TChl по данным MODIS относительно модельных составила $2,0 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$; показателя поглощения света неживым органическим веществом — $0,07 \text{ м}^{-1}$; показателя поглощения света окрашенным органическим веществом — $0,54 \text{ м}^{-1}$; показателя обратного рассеяния света — $0,02 \text{ м}^{-1}$.

Сезонная изменчивость средних значений биооптических показателей по данным моделирования в 2019 г. На рис. 3 (цв. вкладка) показаны временные ряды среднесуточных значений биооптических параметров, полученных в результате моделирования, выполненного с усвоением данных дистанционного зондирования для AZ2 в 2019 г.

Красная линия соединяет среднемесячные значения, показанные также в центре блочной диаграммы, ограниченной величиной стандартного отклонения, с линиями выбросов от минимальных до максимальных значений.

Как видно из графиков, представленных на рис. 3, в начале весны и конце лета происходит резкое повышение значений всех биооптических параметров. Анализ хода кривых, соединяющих среднесуточные значения, показывает, что тенденции изменчивости параметров $a_{\text{ph}}(678)$ и TChl существенно схожи между собой. Хотя пики для различных параметров не совпадают по времени, тем не менее схожие результаты — появление двух локальных максимумов $a_{\text{ph}}(678)$ (рис. 3, а) и $a_{\text{CDM}}(438)$ (рис. 3, з) — получены в летний и осенний сезоны. Также отметим малый разброс средних значений параметра $b_{\text{bp}}(438)$ (рис. 3, в) относительно $0,1 \text{ м}^{-1}$ на протяжении всего 2019 г.

Графики временных рядов на рис. 3 позволяют сравнить средние, дисперсии, минимумы и максимумы различных биооптических параметров. Видно, что наибольшая степень разброса (СКО) для $a_{\text{CDM}}(438)$ и $b_{\text{bp}}(438)$ имеет место в январе, для $a_{\text{CDM}}(438)$ и TChl — июле — сентябре, для $a_{\text{ph}}(678)$ — октябре-ноябре. Заметные выбросы максимальных/минимальных значений отмечаются для $a_{\text{CDM}}(438)$, $a_{\text{ph}}(678)$ и TChl в августе, при этом выброс максимумов/минимумов параметра $b_{\text{bp}}(438)$ практически не меняется в течение года. Асимметрия данных отмечается для $a_{\text{CDM}}(438)$ и TChl в июле и августе; для $a_{\text{ph}}(678)$ — с августа по ноябрь; для $b_{\text{bp}}(438)$ — с января по апрель.

На рис. 4 представлены графики результатов CWT (Continuous Wavelet Transform), где по оси y отложен соответствующий масштаб 15, 30, 60, 90, 180 сут и 1 год, а по оси x — текущий месяц.

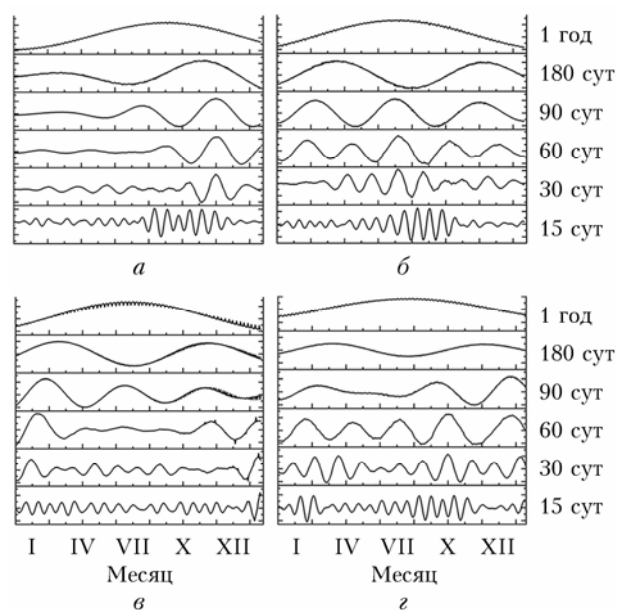


Рис. 4. Частотные характеристики результатов вейвлет-преобразования: $a_{\text{ph}}(678)$ (а), TChl (б), $b_{\text{bp}}(438)$ (в), $a_{\text{CDM}}(438)$ (г), полученные по результатам моделирования для центральной части Азовского моря (AZ2) в 2019 г.

На рис. 5 (цв. вкладка) приведены тепловые карты непрерывных вейвлет-коэффициентов, показанные градиентом от синего цвета к красному, для каждого заданного масштаба и каждого месяца.

Из рис. 4 видно, что временные ряды для всех рассматриваемых параметров имеют хорошо выраженные частотные характеристики только в больших масштабах, от 60 сут до года. Для всех параметров в годовом масштабе, за исключением $a_{ph}(678)$, большая интенсивность биооптических параметров отмечается с апреля по октябрь, а для параметра $a_{ph}(678)$ — с июля по ноябрь.

В полугодовом масштабе для параметров $a_{CDM}(438)$ и $b_{bp}(438)$ имеют место два периода высокой изменчивости: весенний (с марта по май) и осенний (с августа по октябрь), а для параметра $a_{ph}(678)$ — один период: с июля по октябрь. Наиболее выраженный сезонным изменениям в каждом из четырех сезонов подвержен показатель концентрации TChl (рис. 5, б). Для параметров $a_{ph}(678)$ (рис. 5, а) и $a_{CDM}(438)$ (рис. 5, з) характерно отсутствие изменчивости в первой половине года, а с июня-июля по декабрь частота изменений составляет 1,5 месяца. Параметр $b_{bp}(438)$ (рис. 5, в), напротив, характеризуется большей изменчивостью с февраля по июль.

Заключение

Преимущество предлагаемого метода заключается в использовании данных дистанционного зондирования и моделирования, что обуславливает получение непрерывной информации об основных оптически активных компонентах морской среды. Это позволило получить наборы ежечасных данных и пространственно-временных карт биооптических показателей и, как следствие, описать структуру оптических свойств Азовского моря за 2019 г. Среди исследуемых биооптических параметров выделяется четкая изменчивость показателя TChl в каждом из четырех сезонов относительно среднегодового $2,98 \pm 1,22 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$. Наибольшие изменения показателей $a_{CDM}(438)$ и $b_{bp}(438)$ характеризуются двумя хорошо выраженными периодами — весенним (с марта по май) и осенним (с августа по октябрь) — относительно соответствующих среднегодовых $0,42 \pm 0,15$ и $0,10 \pm 0,03 \text{ м}^{-1}$. Максимумы изменений показателя $a_{ph}(678)$ имеют место во второй половине года с июля по октябрь относительно среднегодового $0,04 \pm 0,03 \text{ м}^{-1}$.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания № FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений», шифр «Оперативная океанология».

Список литературы

1. Konik M., Kowalevsk M., Bradtke K., Darecki M. The operational method of filling information gaps in satellite imagery using numerical models // Int. J. Appl. Earth. Obs. Geoinf. 2019. V. 75. P. 66–82. DOI: 10.1016/j.jag.2018.09.002.
2. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V., Zavialov S.P. Bio-optical characteristics of the Russian seas from satellite ocean color data of 1998–2010 // Proc. of the VI International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters”. St.-Petersburg, 2011. P. 181–182.
3. Bailey S.W., Werdell P.J. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 102. N 1–2. P. 12–23. DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.015.
4. Shul'ga T.Ya., Suslin V.V., Stanichnaya R.R. Numerical research of the pollution surface and deep-sea evolution in the Sea of Azov using satellite observation data // Phys. Oceanogr. 2017. V. 6. P. 36–46. DOI: 10.22449/1573-160X-2017-6-36-46.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V: Азовское море / под ред. Н.П. Гоптарева и др. СПб.: Гидрометеониздат, 1991. 234 с.
6. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 1: Азовское море / под ред. Ю.П. Ильина и др. Севастополь, 2009. 400 с.
7. Suslin V.V., Churilova T.Ya., Efimova T.V., Moiseeva N.A., Skorokhod E.Yu., Stepanov I.E. Regional bio-optical algorithm for remote estimation of the Sea of Azov's IOPs // Proc. SPIE. 2020. V. 11560. P. 115600R.
8. Efimova T.V., Churilova T.Ya., Skorokhod E.Yu., Moiseeva N.A., Zemlianskaia E.A. Vertical distribution of bio-optical properties of the Azov — Black Sea basin waters in April–May, 2019 // Phys. Oceanogr. 2020. V. 27, N 5. P. 525–534. DOI: 10.22449/1573-160X-2020-5-525-534.
9. Гидрометеорологический справочник Азовского моря / под ред. А.А. Аксенова. Л.: Гидрометеониздат, 1962. 247 с.
10. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data; 2022 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. DOI: 10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2022.
11. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra Ocean Color Data; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. DOI: 10.5067/TERRA/MODIS/L2/OC/2018.
12. Suetin V.S., Suslin V.V., Korolev S.N., Kucheryavyy A.A. Assessment of the variability of the optical properties of water in the Black Sea in the summer of 1998 using SEAWIFS satellite equipment // Phys. Oceanogr. 2002. 12, N 6. P. 331–340. DOI: 10.1023/A:1021729229168.
13. Churilova T.Ya., Efimova T.V., Moiseeva N.A., Skorokhod E.Yu. Spectral light absorption coefficient of particles and colored dissolved organic matter in the Sea of Azov // Fundam. Appl. Hydrophys. 2022. 15, N 3. P. 73–83. DOI: 10.48612/fpg/ex1p-9vtp-phu8.

14. Kalman R.E. A New approach to linear filtering and prediction problem // J. Bas. Eng. 1960. V. 82, N 1. P. 35–45.

15. Климова Е.Г. Упрощенные модели для расчета ковариационных матриц в алгоритме фильтра Калмана // Метеорол. и гидрол. 2000. № 6. С. 18–30.

T.Ya. Shul'ga, V.V. Suslin. Seasonal variability of the main optically active components of the marine environment according to remote sensing and simulation data.

The purpose of the study is to describe the seasonal variability of optically active components in the Sea of Azov based on continuous information obtained from the combined MODIS-Aqua/Terra satellite observation product and a three-dimensional hydrodynamic model. The paper discusses the results of testing a method for restoring missing data in remote sensing images using the results of three-dimensional hydrodynamic simulation. The method has been tested for four main bio-optical parameters: the concentration of chlorophyll-*a* and pheopigments (TChl), indicators of light absorption by phytoplankton pigments ($a_{ph}(678)$) and non-living organic matter ($a_{CDM}(438)$), and indicator of backscattering of light ($b_{bp}(438)$). The results obtained from the combined product were compared with in situ observations carried out in April–May 2019 on the SRV Professor Vodyanitsky. The deviation of the average TChl values according to MODIS and simulation data relative to in situ observations was 1.8 and $2.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. Analysis of the calculated series of main bio-optical parameters obtained through regular assimilation of MODIS data into a hydrodynamic model made it possible to establish their seasonal variability for the central part of the Azov Sea in 2019. Among the studied bio-optical parameters, a clear seasonal variability of TChl stands out with an average annual value of $2.98 \pm 1.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Changes in $a_{CDM}(438)$ and $b_{bp}(438)$ are characterized by two periods of greatest values: spring (March–May) and autumn (August–October), with corresponding annual averages of 0.42 ± 0.15 and $0.10 \pm 0.03 \text{ m}^{-1}$. Maximal changes in $a_{ph}(678)$ are observed from July to October with an annual average of $0.04 \pm 0.03 \text{ m}^{-1}$. The proposed method takes advantage of remote sensing data, which expand the capabilities of operational oceanological monitoring, and simulation data, which allow filling information gaps in these data. The results provide complete continuous data sets on the distribution of basic bio-optical indicators, which are crucial in predicting the ecological state of sea basins.

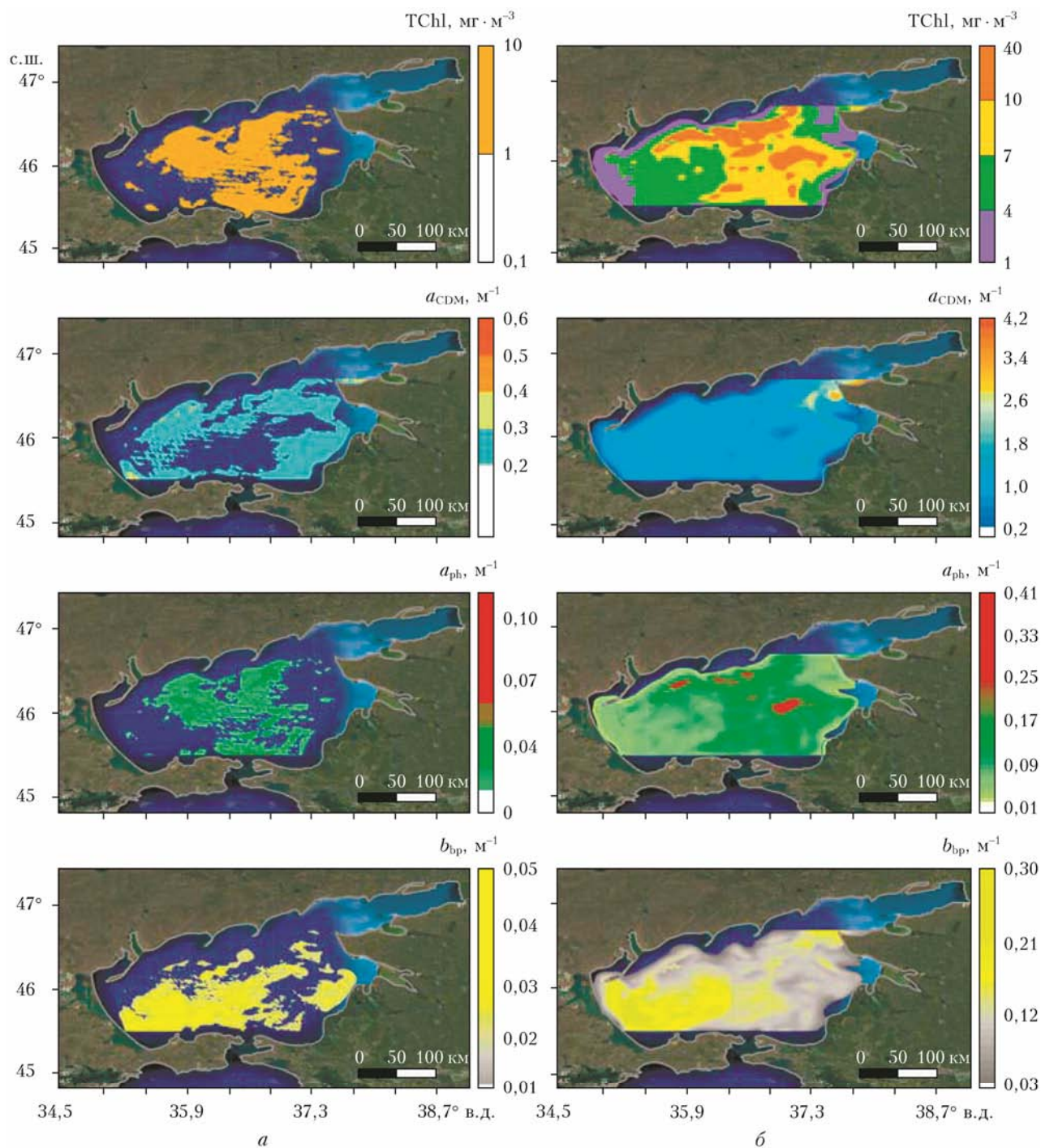


Рис. 2. Карты биооптических показателей по данным MODIS (а) и результатам моделирования (б): TChl (в логарифмическом масштабе), $a_{CDM}(438)$, $a_{ph}(678)$ и $b_{bp}(438)$ (в линейном масштабе)

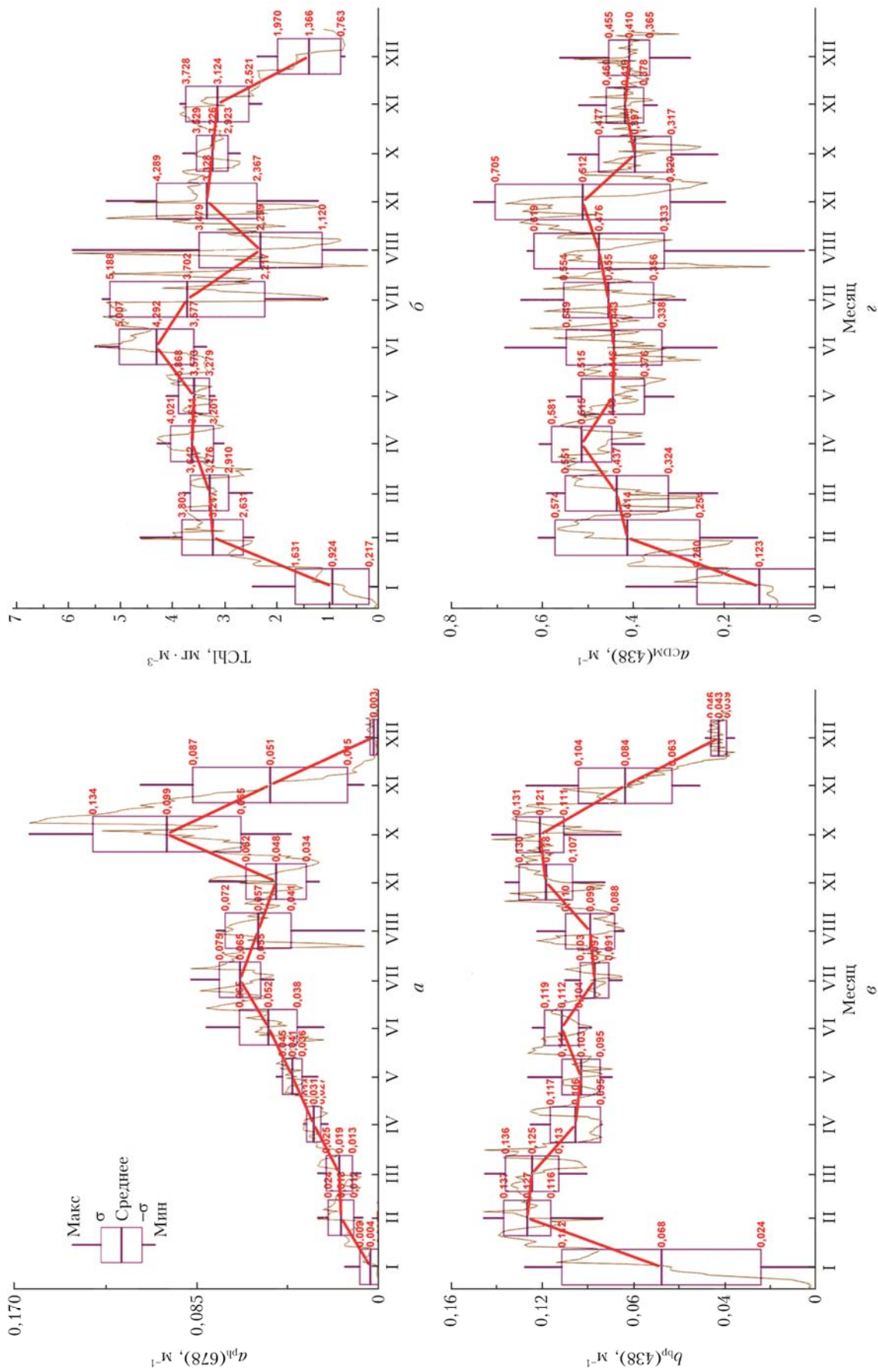


Рис. 3. Временные ряды среднесуточных значений параметров: $a_{ph}(678)$ (а), Tchl (б), $d_{CDM}(438)$ (в), $b_{hp}(438)$ (г), полученные по результатам моделирования для центральной части Азовского моря в 2019 г. Красная линия соединяет среднемесячные значения, показанные в центре боксов, ограниченных величиной стандартного отклонения, с линиями выбросов от минимальных до максимальных значений

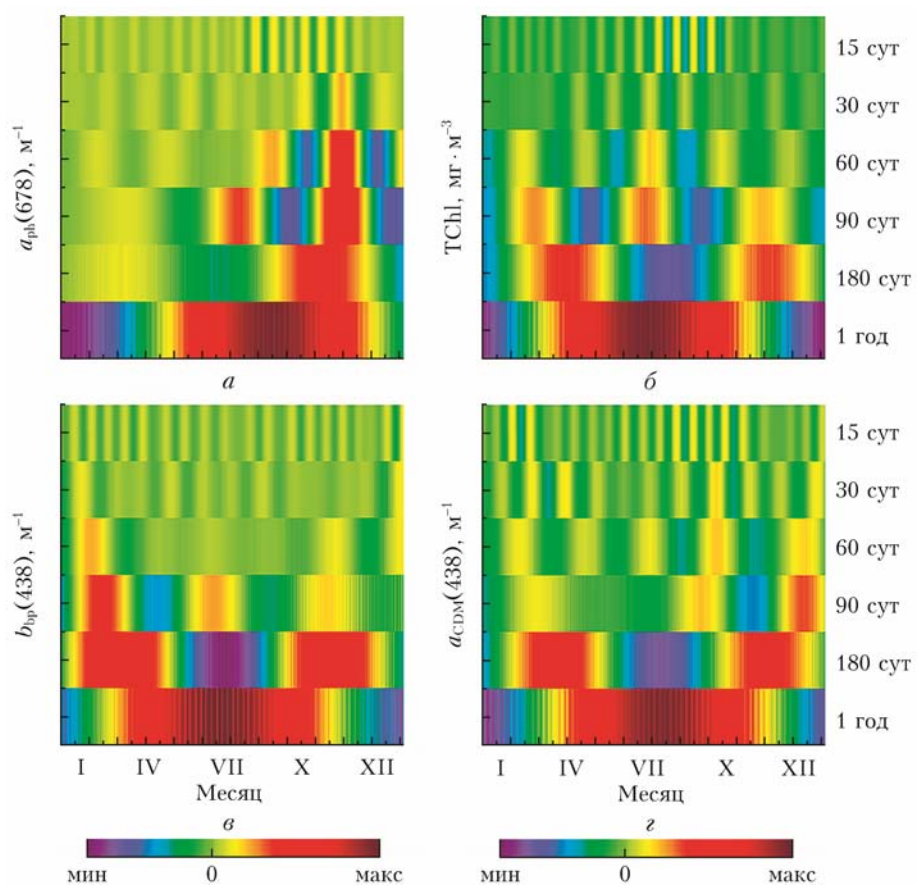


Рис. 5. Тепловые карты непрерывных вейвлет-коэффициентов: $a_{ph}(678)$ (а), $TChl$ (б), $b_{bp}(438)$ (в), $a_{CDM}(438)$ (г), полученные по результатам моделирования для центральной части Азовского моря в 2019 г.