

УДК 551.463

© Т. Я. Шульга*, В. В. Суслин, Д. М. Шукало, А. В. Ингерров

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

*e-mail: shulgaty@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ СЕЗОННЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ СОЛЕНОСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ И БИООПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Статья поступила в редакцию 30.01.2020, после доработки 10.03.2020

Предложен метод получения данных по температуре и солености в Азовском море, основанный на совместном использовании результатов гидродинамического моделирования, данных контактных и дистанционных наблюдений. Приведены результаты численных экспериментов, выполненных с помощью трехмерной гидродинамической модели Princeton Ocean Model и данных атмосферного реанализа SKIRON. В качестве начальных условий в модели использованы среднемноголетние данные *in situ* измерений по температуре и солености за период 1913–2012 гг. Данные *in situ* использованы в гидродинамической модели в качестве начальных полей температуры и солености. Усвоение этих данных в модель выполнено на основании среднемноголетних значений, усредненных по каждому месяцу измерений и сгруппированных в массивы, относящиеся к поверхностному, среднему и придонному слоям моря. Предварительно выполнен анализ данных *in situ*, включающий описание многолетней сезонной изменчивости температуры и солености в Азовском море. Предложена процедура усвоения в гидродинамическую модель информации, полученной из стандартных продуктов второго уровня MODIS на основании установленной связи между значениями солености морской воды и биооптическими характеристиками. Результаты показывают преимущества предлагаемого совместного использования спутниковых данных и результатов ассимиляционного моделирования для получения непрерывной информации о термohалинной структуре моря.

Ключевые слова: Азовское море, температура, соленость, гидродинамическая модель, термohалинная структура, биооптические характеристики, дистанционное зондирование, MODIS.

© T. Y. Shul'ga*, V. V. Suslin, D. M. Shukalo, A. V. Ingerov

Marine Hydrophysical Institute RAS, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

*e-mail: shulgaty@mail.ru

RESEARCH OF THE RELATIONS BETWEEN THE SEASONAL VARIABILITY OF SALINITY AND BIO-OPTICAL FEATURES IN THE SEA OF AZOV USING THE SATELLITE DATA IN THE VISIBLE SPECTRUM RANGE

Received 30.01.2020, in final form 10.03.2020

This paper proposes a method to retrieve water temperature and salinity in the Azov Sea using the results of hydrodynamic modeling, *in situ* data, and satellite images of the visible spectrum range. The results of simulations performed with the three-dimensional hydrodynamic model Princeton Ocean Model by atmospheric reanalysis SKIRON are presented. Long-term monthly average *in situ* measurements of temperature and salinity for the period 1913–2012 were used in the simulation as initial conditions. *In situ* data are used in the hydrodynamic model as initial temperature and salinity fields. The assimilation of these data into the model is based on long-term average values averaged for each month of measurements and grouped into arrays related to the surface, mid-sea and bottom layers of the sea. Preliminary *in situ* data analysis was performed, including a description of long-term seasonal variability of temperature and salinity in the Sea of Azov. The procedure for assimilation of satellite data from MODIS L2 into the hydrodynamic model based on the established relationship between the sea salinity and bio-optical features is suggested. The research shows the advantages of the proposed joint use of satellite data and the results of assimilation modeling to obtain continuous information on the thermohaline structure of water in the Sea of Azov.

Key words: The Sea of Azov, temperature, salinity, hydrodynamic model, thermohaline structure, bio-optical features, remote sensing, MODIS.

Ссылка для цитирования статьи: Шульга Т.Я., Суслин В.В., Шукало Д.М., Ингерров А.В. Исследование связи между сезонными изменениями солености Азовского моря и биооптическими характеристиками по данным спутникового зондирования в видимом диапазоне спектра // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 2. С. 68–75. doi: 10.7868/S2073667320020082

For citation: Shul'ga T.Y., Suslin V.V., Shukalo D.M., Ingerov A.V. Research of the relations between the seasonal variability of salinity and bio-optical features in the Sea of Azov using the satellite data in the visible spectrum range. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 2, 68–75. doi: 10.7868/S2073667320020082

1. Введение

Солёность является одной из основных гидрологических составляющих морской среды, любое ее изменение отражается на биологических ресурсах акватории. В мелководных морских водоемах солёность воды существенно варьируется в зависимости от сезонных различий объема стока рек, притока солёных вод, погодных условий и антропогенных загрязнений [1]. Несмотря на то, что наиболее надежным инструментом определения солёности морской воды являются данные контактных измерений, высокая стоимость их получения и необходимость оперативного прогноза в режиме близком к реальному времени обусловили поиск альтернативных возможностей определения солёности с использованием данных дистанционного зондирования. Наличие пропусков, вызванных общими проблемами дистанционных измерений, существенно ограничивает объем доступной информации. Как вариант, для заполнения пробелов в данных о температуре и солёности можно использовать результаты трехмерных гидродинамических моделей [2, 3]. Такая модель должна иметь пространственное разрешение, сравнимое со спутниковыми изображениями, и постоянно ассимилировать потоки спутниковых данных. В работе [4] рассматривается модельный подход к восстановлению солёности по результатам трехмерного гидродинамического моделирования без использования данных дистанционного зондирования.

В данной работе исследуется сезонная связь между наблюдаемыми *in situ* полями солёности и распределением биооптических характеристик, полученных по спутниковым измерениям цвета морской поверхности в видимом диапазоне спектра, в Азовском море. В частности, рассмотрена возможность получения непрерывной информации о температуре и солёности морской воды на основе дополнения данных контактных и дистанционных измерений результатами трехмерного гидродинамического моделирования.

2. Область исследования

Исследования проводятся в самом континентальном бассейне Эвксинского каскада — Азовском море, полузамкнутом водоеме, отдаленном от Атлантического океана цепочкой, состоящей из четырех проливов и морей [5]. На основании физико-химической характеристики и биологических особенностей моря по Н. М. Книповичу [6, 7], оно занимает промежуточное положение между морскими и пресными водоемами. Присутствие притока речных вод, составляющего до 12 % объема морской воды и затруднённый водообмен с Чёрным морем, обусловили малую солёность азовских вод (10–12 ‰) в три раза меньшую средней солёности океана [5]. Мелководность Азовского моря (средняя глубина ~7 м) является причиной наличия периодов естественных колебаний относительного опреснения и осолонения воды. В настоящее время отмечается осолонение Азовского моря, связанное с уменьшением объема речного стока реки Дон [8, 9]. Транспортный, промышленный и рекреационный потенциал Азовского моря обуславливают необходимость анализа его биологических ресурсов, определяющих условия жизни и хозяйственной деятельности региона, расположенного вдоль его акватории. Появление новых технических возможностей, связанных с ежедневным поступлением качественных данных оптического диапазона с высоким пространственным разрешением, делают возможным мониторинг состояния морской среды. Исследуемая область полностью покрывается данными спутниковых сканеров цвета MODIS-Aqua/Terra, представленных на сайте <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (рис. 1, а; см. вклейку) [10, 11].

3. Материалы и методы

Гидродинамическая модель и ее параметры. Численное исследование циркуляции вод в бассейне Азовского моря основано на применении трехмерной сигма-координатой гидродинамической модели POM (Princeton Ocean Model, <http://www.ccpo.odu.edu/POMWEB>). Эта модель, впервые представленная в [12], является моделью общей циркуляции океана, реализующей решение системы примитивных уравнений гидродинамики, записанных в приближениях несжимаемости, гидростатики и Буссинеска. Моделирование выполняется для реальной топографии дна с учетом притока вод реки Дон с объемом стока 13–16 км³/год [8]. Карта батиметрии и конфигурации береговой линии Азовского моря построена на основе оцифровки гидрографических данных с последующей интерполяцией на сетку модели с разрешением 1.4 км (396 × 295 узлов) по горизонтали и 11 уровнями по вертикали. На твердых границах выполняется условие отсутствия потока жидкости, перпендикулярного боковым границам, и равенство нулю касательных напряжений. В качестве начальных условий по температуре и солёности в модели ежемесячно на трех горизонтах усваиваются среднемесячные поля температуры и солёности, полученные на основе среднесезонных климатических данных [13–15], обобщающих наблюдения за 1913–2012 гг.

Информация о полях ветра и атмосферного давления, используемых в численных экспериментах. В численных экспериментах учитывается реальное атмосферное воздействие по данным регионального атмосферного реанализа SKIRON (<http://forecast.uoa.gr>). Используемый вариант атмосферной модели, основанной на усвоении данных метеорологических наблюдений, созданный в Афинском университете представляет собой 72-часовой прогноз метеорологических параметров для Азово-Черноморского и Средиземноморского бассейнов с шагом по времени 2 ч и горизонтальным разрешением 0.1° [16]. Данные реанализа SKIRON ежечасно усваиваются в модель РОМ путем интерполяции значений скорости ветра и атмосферного давления на расчетную сетку бассейна Азовского моря.

Источники данных *in situ* наблюдений температуры и солености в Азовском море. Данные о распределении температуры и солености в Азовском море получены на основе информации из базы океанографических данных ЮНЦ РАН за 1913–2006 гг., представленной в Климатическом атласе Азовского моря [13], дополненной данными за 2007–2012 гг. из «Атласа климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария», содержащем наблюдения в Азовском море (<http://atlas.ssc-ras.ru/azs/azs-invent.html>) [14]. Данные в атласах представлены значениями температуры и солености на станциях с указанием их координат и горизонта измерения. Эти данные обобщены с информацией о температуре и солености за 2002–2006 гг. из банка океанографических данных Морского гидрофизического института РАН [17] и сайтов <https://www.seadatanet.org/> и https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html и используются в качестве начальных условий в модели РОМ.

Метод расчета биооптических характеристик по систематизированным данным стандартных спутниковых продуктов MODIS. Для реализации подхода, обсуждаемого в данной работе, использованы первичные гидрооптические характеристики Азовского моря, полученные по данным NASA Ocean Color. Эти данные имеют километровое пространственное разрешение и предварительно отбракованы по критериям, представленным в [18]. Наборы спутниковых данных преобразованы в пространственные карты распределения биооптических характеристик $index34$ и $b_{bp}(555)$ по акватории Азовского моря. Значения биооптических характеристик физически связаны не с солёностью как таковой, а с концентрацией в воде взвешенных терригенных примесей: эти последние определяются в значительной степени материковым стоком, а потому опосредованно коррелируют с солёностью. Индекс $index34$ характеризует суммарное поглощение света живой и неживой компонентами органического вещества в морской воде [18] и определяется как отношение коэффициентов яркости моря: $index34 = [R_{rs}(531) \cdot F_o(531)] / [R_{rs}(488) \cdot F_o(488)]$, где $F_o(\lambda)$ — солнечная постоянная на длине волны длиной λ [19]. Второй — показатель рассеяния света назад частицами взвеси на длине волны 555 нм: $b_{bp}(555) = \{6.76 \cdot L_{WN}(555) + 0.03 \cdot [L_{WN}(555)]^3 + 3.4 \cdot L_{WN}(555) \cdot [I_{510}]^{3.8} - 0.84\} \cdot 10^{-3} (\text{м}^{-1})$, где $L_{WN}(\lambda) = R_{RS}(\lambda) \cdot F_o(\lambda)$ ($\text{мк} \cdot \text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$) и $I_{510} = L_{WN}(555) / L_{WN}(510)$ [20]. Предварительно спутниковые данные MODIS-Aqua в случае частичного или полного отсутствия изображений дополняются данными со спутника MODIS-Terra.

4. Анализ и обсуждение результатов

Многолетняя сезонная изменчивость термохалинной структуры вод Азовского моря. Для подготовки *in situ* данных к использованию в модели предварительно выполнен их анализ, включающий описание многолетней сезонной изменчивости температуры и солености в Азовском море. На основе среднемесячной статистики построены тепловые матрицы сезонной межгодовой изменчивости температуры и солености Азовского моря за период наблюдений 1913–2012 гг., представленные на рис. 2 (см. вклейку).

Анализ результатов мониторинга климатологических значений температуры и солености (рис. 2, в табл. 1) за последнее столетие показывает более высокую межгодовую изменчивость солености для исследуемого региона. Как видно из рис. 2, периоды наибольших значений солености, отмечающиеся в 1931–1941 гг. и 1957–1973 гг., почти в 2 раза превышают периоды ее наименьших значений, наблюдаемые в 1997–2012 гг.

Усвоение этих данных в модель выполнено на основании среднемноголетних значений, усредненных по каждому месяцу измерений и сгруппированных в массивы, относящиеся к поверхностному, среднему и придонному слоям моря. Для этой цели неоднородная по глубине исследуемая область была разделена на три субрегиона (рис. 1, б): более мелководные части — Таганрогский залив (I) и Азовское море (II), и глубоководную часть — Керченский пролив и прилегающую к нему часть Черного моря (III). Такое разделение позволило получить более точную оценку исследуемых параметров в мелководной (максимальная глубина ~14 м) и глубоководной частях (максимальная глубина ~200 м). Процедура районирования исследуемой акватории с дальнейшим разделением каждого из субрегионов по слоям (поверхностный, средний и придонный) основана на грациях, представленных в табл. 2, и реализована на языке PYTHON. Стоит отметить, что из-за недостатка данных или их неравномерного распределения по акватории I района в придонном

Таблица 1

Среднемноголетние среднемесячные *in situ* данные по температуре и солености Азовского моря за 1913–2012 гг., осредненные по всем субрегионам и глубинам

Monthly average *in situ* data on the temperature and salinity of the Sea of Azov for 1913–2012 averaged by all sub regions and depths

	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
$T, ^\circ\text{C}$	3.4	4.0	4.6	8.7	15.8	19.9	22.9	23.0	19.3	14.5	9.5	5.9
$S, \text{‰}$	12.7	14.3	12.8	11.6	10.9	11.2	11.1	11.8	11.3	12.1	12.1	12.0

Таблица 2

Глубина поверхностного, среднего и придонного слоев моря в субрегионах

Depth of the surface, middle and bottom sea layers at the subregions

Субрегион	Поверхностный слой	Средний слой	Придонный слой
I	≤ 2 м	2–10 м	> 10 м
II	≤ 2 м	2–10 м	> 10 м
III	≤ 20 м	20–50 м	> 50 м

слое не были рассчитаны поля температуры и солености. Также при анализе солености в субрегионе II не учитывались измерения в области оз. Сиваш, так как соленость в данных координатах негативно сказывается на значениях общей среднемноголетней статистики.

Анализируемые *in situ* данные, усредненные по месяцам на всех станциях за весь период наблюдений (1913–2006 гг.), представлены на рис. 3 (см. вклейку) на различных слоях моря в виде кумулятивных графиков температуры и солености для каждого субрегиона. Кривые средних значений солености демонстрируют заметные отличия для глубоководного (III) и мелководного районов (I, II) исследуемой области. Соленость в Таганрогском заливе в поверхностном и среднем слоях моря (I район) не превышает значения 7 ‰ (октябрь), ее минимальные значения имеют место в марте (0.9 ‰). В центральной части Азовского моря (II) соленость изменяется в узком диапазоне 9–13 ‰, ее наибольшие значения отмечаются в марте и октябре. Наибольшие значения солености для исследуемой области отмечаются в районе Керченского пролива (III). В среднем слое моря ее значения достигают 17.9 ‰, превышая в три раза соленость в Таганрогском заливе.

По сравнению с изменениями солености, сезонный характер температурных кривых практически одинаков для различных слоев моря и субрегионов исследуемой области (рис. 3). Кривые распределения среднемесячных значений температуры имеют вид кривых нормального закона. Максимум температуры Азовского моря наблюдается в августе и составляет 24.7 °C, отклонение максимальных значений температуры между субрегионами и слоями не превышает 1 °C. Минимальная температура моря наблюдаемая в январе в I субрегионе (0.1 °C), на 3.5 °C меньше минимума, отмеченного в III субрегионе, обусловленного водообменом с Черным морем. Подробный количественный анализ среднемесячных данных, усредненных за весь период наблюдений, представлен в табл. 3. Здесь на различных слоях моря по каждому исследуемому субрегиону приведены максимальные, минимальные и средние с учетом их среднеквадратичных отклонений (σ) значения по температуре и солености.

Анализ связи между биооптическими характеристиками и данными *in situ* наблюдений солености. Определение связи между значениями солености в поверхностном слое Азовского моря и биооптическими характеристиками выполнено для двух временных периодов, характеризующихся наличием достаточного большого числа спутниковых и *in situ* данных. Для этого каждому измерению *in situ* поставлены в соответствие значения $index34$ и $b_{bp}(555)$, рассчитанные в области с географическими координатами, отклоняющимися от точки натурных измерений не более чем на $\pm 0.01^\circ$. Для установления общих тенденций связи между полученными наборами данных в уравнениях регрессии выбирался как можно наименьший порядок полиномов, начиная от линейного. При слабой корреляционной зависимости с коэффициентом корреляции меньшим 0.5 порядок полиномов повышался на единицу до выполнения условия $R \geq 0.6$ хотя бы по одной из биооптических характеристик. Показанные на рис. 4 и 5 (см. вклейку) доверительные границы прогноза с 95 % вероятностью рассчитывались с использованием критерия Стьюдента в программном пакете *Origin-Lab* (<https://www.originlab.com/>). На рис. 4 представлены результаты регрессионного анализа, демонстрирующего связь между *in situ* данными и биооптическими характеристиками.

Таблица 3

Максимальные, минимальные и средние со стандартными отклонениями значения солёности и температуры по данным *in situ* за 1913–2006 гг.

Maximum, minimum and average values with standard deviations according to *in situ* observations on the temperature and salinity of the Sea of Azov in 1913–2006

Субрегионы		Солёность, ‰			Температура, °C		
		$S_{\min}$	$S_{\max}$	$S_{\text{avg}} \pm \sigma$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	$T_{\text{avg}} \pm \sigma$
I	Поверхностный слой	1.0	6.4	4.26 ± 1.37	0.1	24.1	11.58 ± 9.45
	Средний слой	1.9	7.0	4.87 ± 1.28	1.1	23.7	12.80 ± 9.08
II	Поверхностный слой	9.9	11.8	10.89 ± 0.53	0.4	24.2	12.21 ± 9.23
	Средний слой	10.0	12.4	11.08 ± 0.61	1.1	24.7	11.92 ± 8.81
	Придонный слой	10.9	12.1	11.62 ± 0.38	0.9	23.9	11.53 ± 9.08
III	Поверхностный слой	12.4	15.9	13.63 ± 1.11	3.6	23.9	12.85 ± 8.09
	Средний слой	11.4	17.9	12.95 ± 1.71	3.2	23.7	12.51 ± 8.00
	Придонный слой	10.8	14.0	12.52 ± 0.94	1.1	23.8	13.08 ± 8.13

Анализ проведен для июня как наиболее обеспеченного информацией месяце за 2002–2006 гг. ($N = 25684$). Величина коэффициента корреляции $R \geq 0.85$, представленная в табл. 4 вместе с другими параметрами регрессионных кривых, позволила использовать установленную зависимость для восстановления солёности по значениям $index34$ и $b_{bp}(555)$. Регрессионный анализ для весеннего и осеннего сезонов выполнен по наибольшим из имеющихся наборов *in situ* и спутниковых данных в 2007–2008 гг. ($N = 846$). Регрессионные кривые для каждого из случаев, представленных в табл. 4, показаны на рис. 5 (см. вклейку).

Таблица 4

Статистика регрессионной связи между данными *in situ* и биооптическими характеристиками в 2007–2008 гг.

Statistics of the regression concatenating the data *in situ* observations and bio-optical features in 2007–2008

Параметры	$index34$	$b_{bp}(555)$
июнь 2002–2006 гг., I – III субрегионы, регрессия $y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3$		
$A \pm \sigma$	-32.57 ± 2.45	8.99 ± 0.07
$B \pm \sigma$	98.35 ± 4.43	261.76 ± 6.24
$C \pm \sigma$	-69.21 ± 2.63	-10346.59 ± 155.91
$D \pm \sigma$	14.74 ± 0.513	82000.58 ± 1150.29
N	25684	25684
R	0.85	0.87
апрель 2008 гг., I субрегион, уравнение регрессии $y = A + Bx + Cx^2$		
$A \pm \sigma$	-75.67 ± 15.53	-12.14 ± 2.12
$B \pm \sigma$	102.07 ± 17.83	148.51 ± 18.41
$C \pm \sigma$	-31.43 ± 5.11	-282.57 ± 39.65
N	288	288
R	0.73	0.63
апрель 2007 гг., II и III субрегионы, уравнение регрессии $y = A + Bx$		
$A \pm \sigma$	-16.05 ± 4.86	11.59 ± 0.15
$B \pm \sigma$	16.32 ± 3.09	-61.63 ± 4.19
N	226	226
R	0.33	0.70
сентябрь–октябрь 2007 гг., I субрегион, уравнение регрессии $y = A + Bx + Cx^2$		
$A \pm \sigma$	29.20 ± 12.34	-0.023 ± 1.53
$B \pm \sigma$	-22.91 ± 11.89	151.49432 ± 38.25
$C \pm \sigma$	5.34 ± 2.85	-1107.00143 ± 233.59
N	116	116
R	0.21	0.58

В общей сложности для этого периода получено три основных зависимости (перечисленные в табл. 4), характеризующиеся значением коэффициента корреляции большим 0.6. Для сравнительно небольших наборов данных этот показатель является критерием использования восстановленных значений солености для усвоения в гидродинамическую модель. Информация для II и III субрегионов в осенний период имела малоинформативный характер и не использовалась для усвоения в РОМ.

Как видно из рис. 5, б, чем меньше соленость (Таганрогский залив), тем меньшая связь наблюдается с данными $b_{bp}(555)$. В открытой части Азовского моря, области с высокой соленостью, прослеживается отрицательная корреляция между значениями $b_{bp}(555)$ и данными измерений.

Анализ результатов гидродинамического моделирования. Для получения непрерывной информации о температуре и солености морской воды в Азовском море используются результаты трехмерного гидродинамического моделирования РОМ. Расчет проводится в течение 365 сут, начало расчета отсчитывается от 01.01.2007 г. На начало каждого месяца в модель усваиваются подготовленные среднемноголетние данные по температуре и солености на трех горизонтах. Кроме этого в модель усваиваются значения солености в поверхностном слое моря, восстановленные по данным *index34* или $b_{bp}(555)$ соответствующие дате спутникового снимка [2]. Результаты моделирования позволяют построить прогнозные трехмерные поля температуры и солености в Азовском море. Карты солености в поверхностном слое моря, построенные по данным моделирования, представлены на рис. 6 (см. вклейку).

Видно, что распределение солености весной (в марте и мае) показывает достаточно большое опреснение в Таганрогском заливе, что подтверждается анализом среднемноголетних данных. В середине и конце мая на рис. 6 хорошо виден заток пресных вод в Черное море от дельты Дона через Керченский пролив. Для летнего сезона характерно менее контрастное распределение солености (рис. 6, июль), достигающее в центральной части акватории Азовского моря значений 10–14 ‰. Наиболее однородное распределение солености имеет место в сентябре с максимальными значениями до 15 ‰, отмечающимися в районе Керченского пролива.

5. Заключение

В работе представлен анализ пространственной и вертикальной структуры температуры и солености по субрегионам Азовского моря на основе среднемноголетних данных *in situ* наблюдений за 1913–2012 гг. Результаты основаны на статистическом анализе и трехмерном гидродинамическом моделировании с использованием сигма-координатной модели РОМ. Показана возможность использования в качестве индикатора пространственной изменчивости солености значений биооптических характеристик, доступных на основании обработки стандартных продуктов второго уровня MODIS. Установлена сезонная регрессионная связь между наблюдаемыми *in situ* значениями солености и рассматриваемыми биооптическими характеристиками. Предложен механизм усвоения в гидродинамическую модель как среднемноголетних, так и восстановленных значений солености по данным спутникового зондирования. Данные наблюдений [14] и поля солености, полученные с использованием трехмерной гидродинамической модели, продемонстрировали хорошее качественное совпадение районов опресненных морских вод и направления изменения положения их границ в акватории Азовского моря. Результаты работы демонстрируют возможность использования данных дистанционного зондирования для получения непрерывной информации о трехмерной структуре полей температуры и солености морской воды на примере Азовского моря.

6. Благодарности

Авторы выражают благодарности двум анонимным рецензентам за полезные замечания, способствующие улучшению статьи.

7. Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по № 0827–2019–0004 (шифр «Прибрежные исследования») и гранта РФФИ 18–45–920070.

Литература

1. Wolanski E., Elliott M. Estuarine Ecohydrology: An Introduction. Elsevier Science, Amsterdam, 2015. 322 p.
2. Шульга Т.Я., Суслин В.В. Исследование эволюции пассивной примеси в поверхностном слое Азовского моря на основе усвоения данных сканера MODIS-Aqua в гидродинамическую модель // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 73–80.

3. Konik M., Kowalevski M., Bradtke K., Darecki M. The operational method of filling information gaps in satellite imagery using numerical models // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. V. 75. P. 66–82.
4. Матишов Г.Г., Архипова О.Е., Чикин А.Л. Модельный подход к восстановлению данных по солености на примере Азовского моря // *Доклады академии наук*. 2018. Т. 420, № 5. С. 687–690.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море / Под ред. Н. П. Гоптарева, А. И. Симонова, Б. М. Затучной, Д. Е. Гершановича. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 236 с.
6. Книпович Н.М. Работа Азовской научно-промысловой экспедиции в 1922–1924 гг. (предварительный отчет) // *Тр. Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции*. Керчь, 1926. Вып. 1. С. 4–51.
7. Книпович Н.М. Гидрология морей и солоноватых вод: (в применении к промысловому делу). М.-Л.: Пищепромиздат, 1938. 514 с.
8. Косенко Ю.В., Баскакова Т.Е., Картамышева Т.Б. Роль стока реки Дон в формировании продуктивности Таганрогского залива // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2018. Т. 1, № 3–4. С. 32–39.
9. Матишов Г.Г., Гаргона Ю.М., Бердников С.В., Дженюк С.Л. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. М.: Наука, 2006. 304 с.
10. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0/ (дата обращения: 28.12.2019).
11. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0/ (дата обращения: 28.12.2019).
12. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three-dimensional coastal ocean circulation model // *Three-Dimensional Coastal Ocean Models* / Ed. N. Heaps. Washington, D. C.: American Geophysical Union. 1987. V. 4. P. 1–16.
13. Matishov G.G., Matishov D.G., Berdnikov S.V. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006. Washington: Silver Spring, 2006.
14. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П. и др. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2014. 256 с.
15. Матишов Г.Г., Степаньян О.В. Научно-исследовательское судно «Профессор Панов» — 15 лет морских научных исследований // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 5. С. 446–453. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-446-453
16. Kallos G. et al. The Regional Weather Forecasting System SKIRON and its capability for forecasting dust uptake and transport // *Proceedings of the WMO conference on dust storms*. Damascus, 1–6 Nov. 1997. P. 9.
17. Баянкина Т.М., Годин Е.А., Жук Е.В., Ингеров А.В., Исаева Е.А., Халиулин А. Х. Информационные ресурсы Морского гидрофизического института РАН // *Процессы в геосредах*. 2017. № 4 (13). С. 651–659.
18. 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. V. 37, N 18. P. 4380–4400.
19. 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. VI Int. Conf. “Current problems in optics of natural waters”*. St. Petersburg, 2011. P. 181–182.
20. Suetin V.S., Suslin V.V., Korolev S.N., Kucheryavyy 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. 12(6). P. 331–340.

References

1. Wolanski E., Elliott M. Estuarine Ecohydrology: An Introduction. Elsevier Science, Amsterdam, 2015. 322 p.
2. Shul'ga T.Ya., Suslin V.V. Investigation of the evolution of the suspended solids in the Sea of Azov based on the assimilation of satellite data in a hydrodynamic model. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11(3), 73–80 (in Russian).
3. Konik M., Kowalevski M., Bradtke K., Darecki M. The operational method of filling information gaps in satellite imagery using numerical models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019, 75, 66–82.
4. Matishov G.G., Arhipova O.E., Chikin A.L. A model approach to the restoration of salinity data on the example of the Sea of Azov. *Doklady RAS*. 2018, 420, 5, 687–690 (in Russian).
5. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. V. Sea of Azov / Eds. N. P. Goptarev, A. I. Simonov, B. M. Zatuchnaya, D. E. Gershanovich. SPb., Hydrometeoizdat, 1991. 236 p. (in Russian).
6. Knipovich N.M. The work of the Azov scientific and field expedition in 1922–1924. *Pr. Azov-Black Sea Scientific Expedition Kerch*. 1926, 1, 4–51 (in Russian).
7. Knipovich N.M. Hydrology of the seas and brackish waters (as applied to fishing). Leningrad, Pischepromizdat, 1938. 514 p. (in Russian).

8. Kosenko Yu.V., Baskakova T.E., Kartamysheva T.B. The role of the Don River runoff in the formation of productivity of the Taganrog Bay. *Vodniye Bioresursy i Sreda Obitaniya*. 2018, 1, 3–4, 32–39 (in Russian).
9. Matishov G.G., Gargopa Yu.M., Berdnikov S.V., Dzhenyuk S.L. Patterns of ecosystem processes in the Sea of Azov. *Moscow, Nauka*, 2006. 304 p. (in Russian).
10. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0/ (date of access: 28.12.2019).
11. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0/ (date of access: 28.12.2019).
12. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models* / Ed. N. Heaps. Washington, D. C.: *American Geophysical Union*. 1987, 4, 1–16.
13. Matishov G.G., Matishov D.G., Berdnikov S.V. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006. *Washington, Silver Spring*, 2006.
14. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P. et al. Atlas of climate change in large marine ecosystems of the Northern Hemisphere (1878–2013). *Rostov-on-Don, SSC RAS*, 2014. 256 p. (in Russian).
15. Matishov G.G., Stepanyan O.V. R/V “Professor Panov”: 15 Years of Marine Scientific Research. *Physical Oceanography*, [e-journal]. 2018, 25(5), 412–419. doi:10.22449/1573–160X-2018–5–412–419
16. Kallos G. et al. The Regional Weather Forecasting System SKIRON and its capability for forecasting dust uptake and transport. *Proceedings of the WMO Conference on Dust Storms*. Damascus, 1–6 Nov. 1997. P. 9.
17. Bayankina T.M., Godin E.A., ZHuk E.V., Ingerov A.V., Isaeva E.A., Haliulin A.H. Information Resources of the Marine Hydrophysical Institute of the RAN. *Processy v Geosredakh*. 2017, 4 (13), 651–659 (in Russian).
18. 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, 37, 18, 4380–4400.
19. 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. VI Int. Conf. “Current Problems in Optics of Natural Waters”*. St. Petersburg, 2011, 181–182.
20. Suetin V.S., Suslin V.V., Korolev S.N., Kucheryavyy 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, 12(6), 331–340.

К статье Шульга Т.Я., Суслин В.В., Шукало Д.М., Ингеров А.В. Исследование связи между сезонными изменениями солености Азовского моря...

Shul'ga T.Y., Suslin V.V., Shukalo D.M., Ingerov A.V. Research of the relations between the seasonal variability of salinity and bio-optical features in the Sea of Azov using...

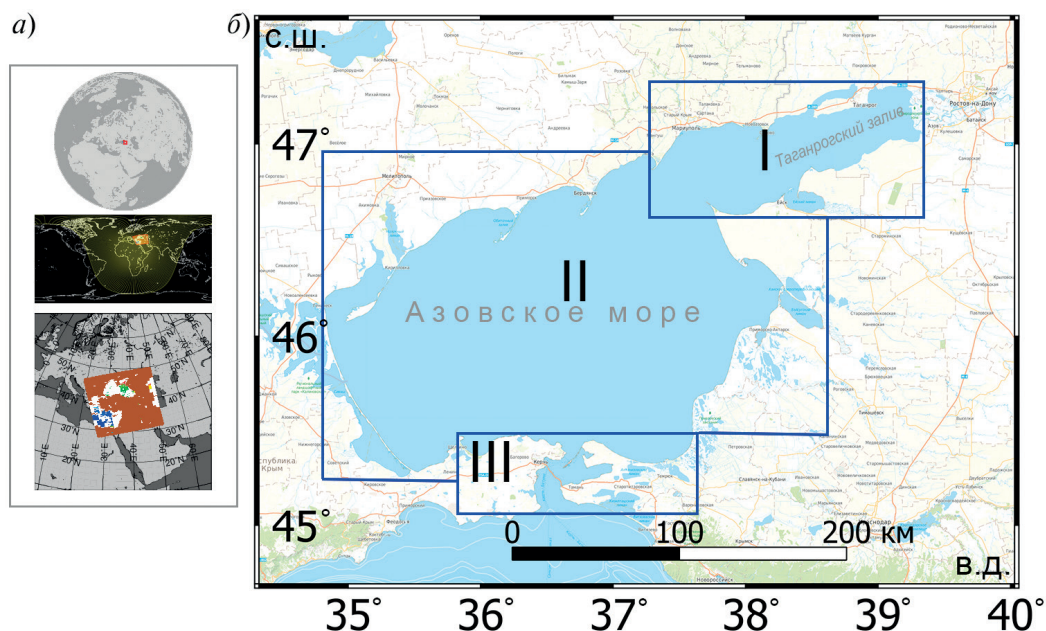


Рис. 1. Изображение области исследования на сайте *Ocean Color* (а) и на карте (б). Синие прямоугольники отображают границы субрегионов: I — Таганрогский залив: 46°60'–47°30' с. ш., 37°75'–39°30' в. д.; II — центральная часть Азовского моря; III — Керченский пролив и прилегающие части Азовского и Черного морей: 35°50'–37°70' с. ш., 45°–45°45' в. д.

Fig. 1. Image of the investigated area on the *NASA's Ocean Color* web site (a) and on the map (b). Blue rectangles indicate the boundaries of subregions: I — Taganrog Bay: 46°60'–47°30' N, 37°75'–39°30' E; II — the central part of the Sea of Azov; III — the Kerch Strait and adjacent parts of the Azov and Black Seas: 35°50'–37°70' N, 45°–45°45' E.

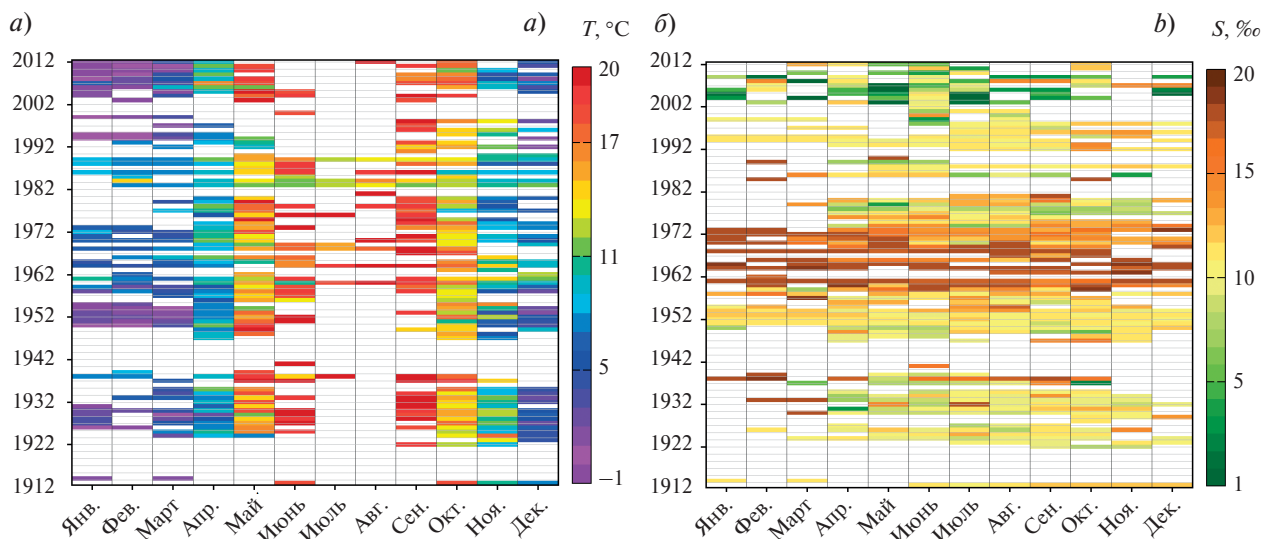


Рис. 2. Среднемесячные значения температуры (а) и солености (б) Азовского моря по каждому году *in situ* наблюдений 1913–2012 гг. Белым цветом отмечены пропуски в данных.

Fig. 2. The monthly average *in situ* observations of the temperature (a) and salinity (b) at the Sea of Azov for each year in 1913–2012. Blanks in the data are marked in white.

К статье Шульга Т.Я., Суслин В.В., Шукало Д.М., Ингеров А.В. Исследование связи между сезонными изменениями солености Азовского моря...

Shul'ga T.Y., Suslin V.V., Shukalo D.M., Ingerov A.V. Research of the relations between the seasonal variability of salinity and bio-optical features in the Sea of Azov using...

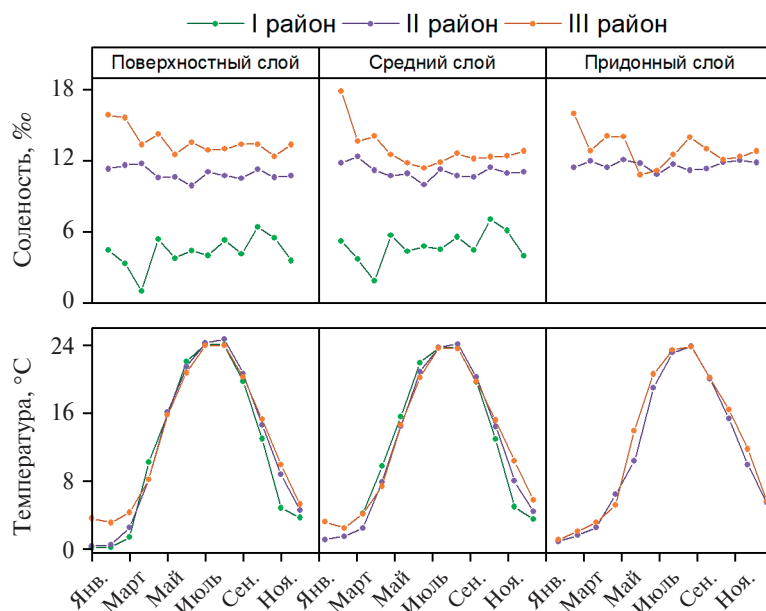


Рис. 3. Среднемноголетние среднemesячные значения солености и температуры Азовского моря по *in situ* данным, осредненным за 1913–2006 гг.

Fig. 3. Long-term monthly average *in situ* observations on the temperature and salinity of the Sea of Azov in 1913–2006.

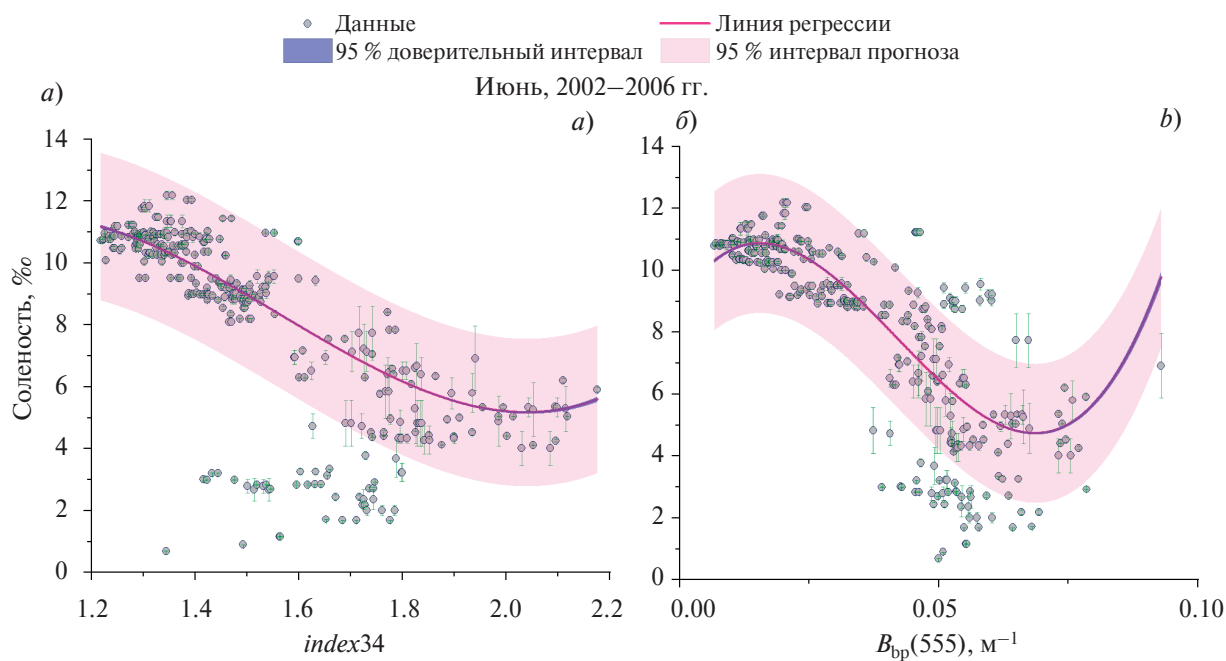


Рис. 4. Регрессионные зависимости между *in situ* значениями солености в Азовском море и биооптическими характеристиками *index34* (а) и $b_{bp}(555)$ (б) в июне 2002–2006 гг.

Fig. 4. Regression curves concatenating the data *in situ* observations and the bio-optical features (*index34* (a), $b_{bp}(555)$ (b)) of the Sea of Azov at the June 2002–2006.

К статье Шульга Т.Я., Суслин В.В., Шукало Д.М., Ингеров А.В. Исследование связи между сезонными изменениями солености Азовского моря...

Shul'ga T.Y., Suslin V.V., Shukalo D.M., Ingerov A.V. Research of the relations between the seasonal variability of salinity and bio-optical features in the Sea of Azov using...

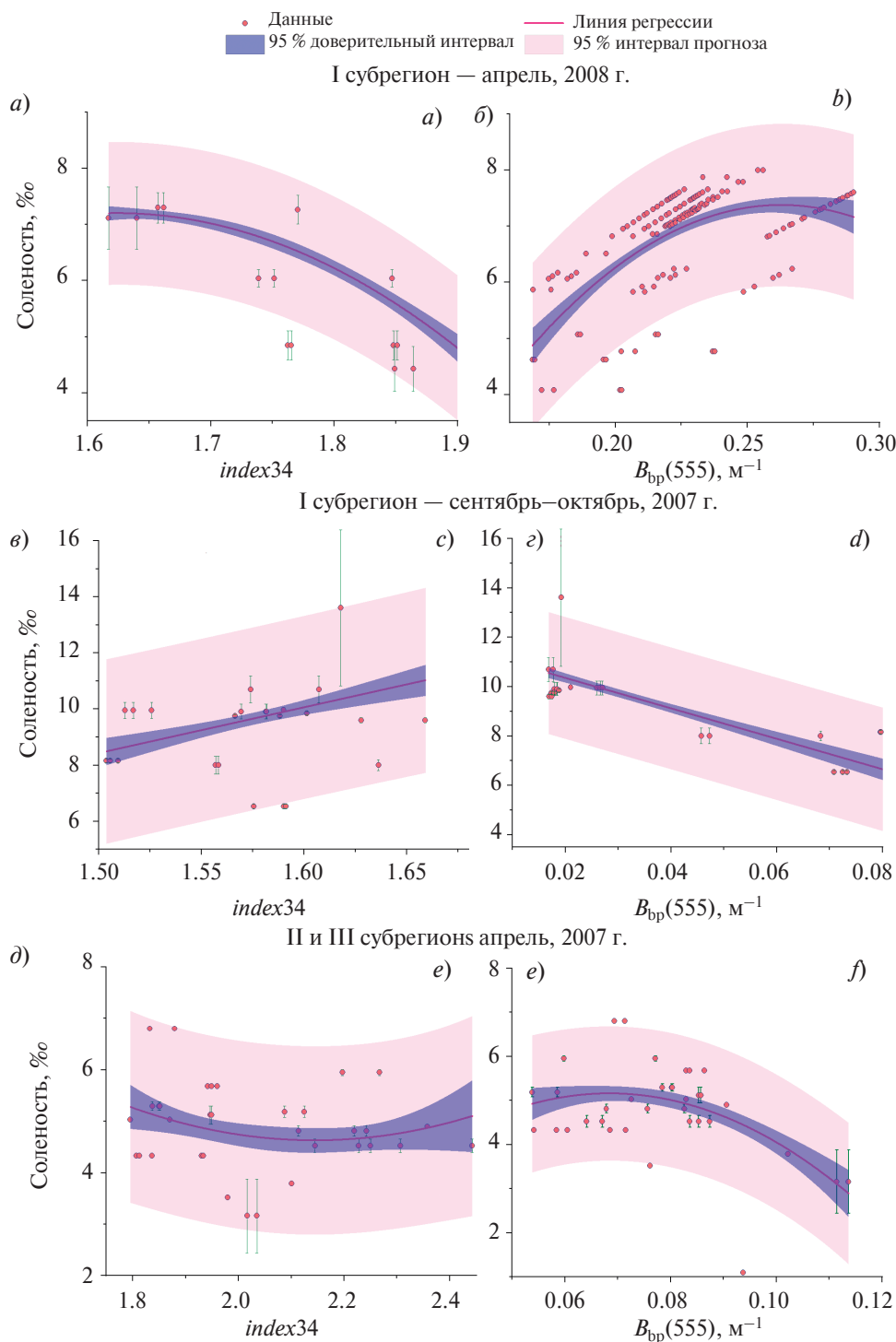


Рис. 5. Регрессионные зависимости между *in situ* значениями солености в Азовском море и биооптическими характеристиками в 2007–2008 гг. В апреле: I субрегион — $index34$ (а) и $b_{bp}(555)$ (б), II и III субрегионы — $index34$ (в) и $b_{bp}(555)$ (г). Для I субрегиона в осенний сезон — $index34$ (д) и $b_{bp}(555)$ (е).

Fig. 5. Regression curves concatenating the data *in situ* observations and the bio-optical features of the Sea of Azov in 2007–2008. April: I subregion — $index34$ (a), $b_{bp}(555)$ (b), II and III subregions — $index34$ (c), $b_{bp}(555)$ (d). I subregion in the fall season — $index34$ (e), $b_{bp}(555)$ (f).

К статье Шульга Т.Я., Суслин В.В., Шукало Д.М., Ингеров А.В. Исследование связи между сезонными изменениями солености Азовского моря...

Shul'ga T.Y., Suslin V.V., Shukalo D.M., Ingerov A.V. Research of the relations between the seasonal variability of salinity and bio-optical features in the Sea of Azov using...

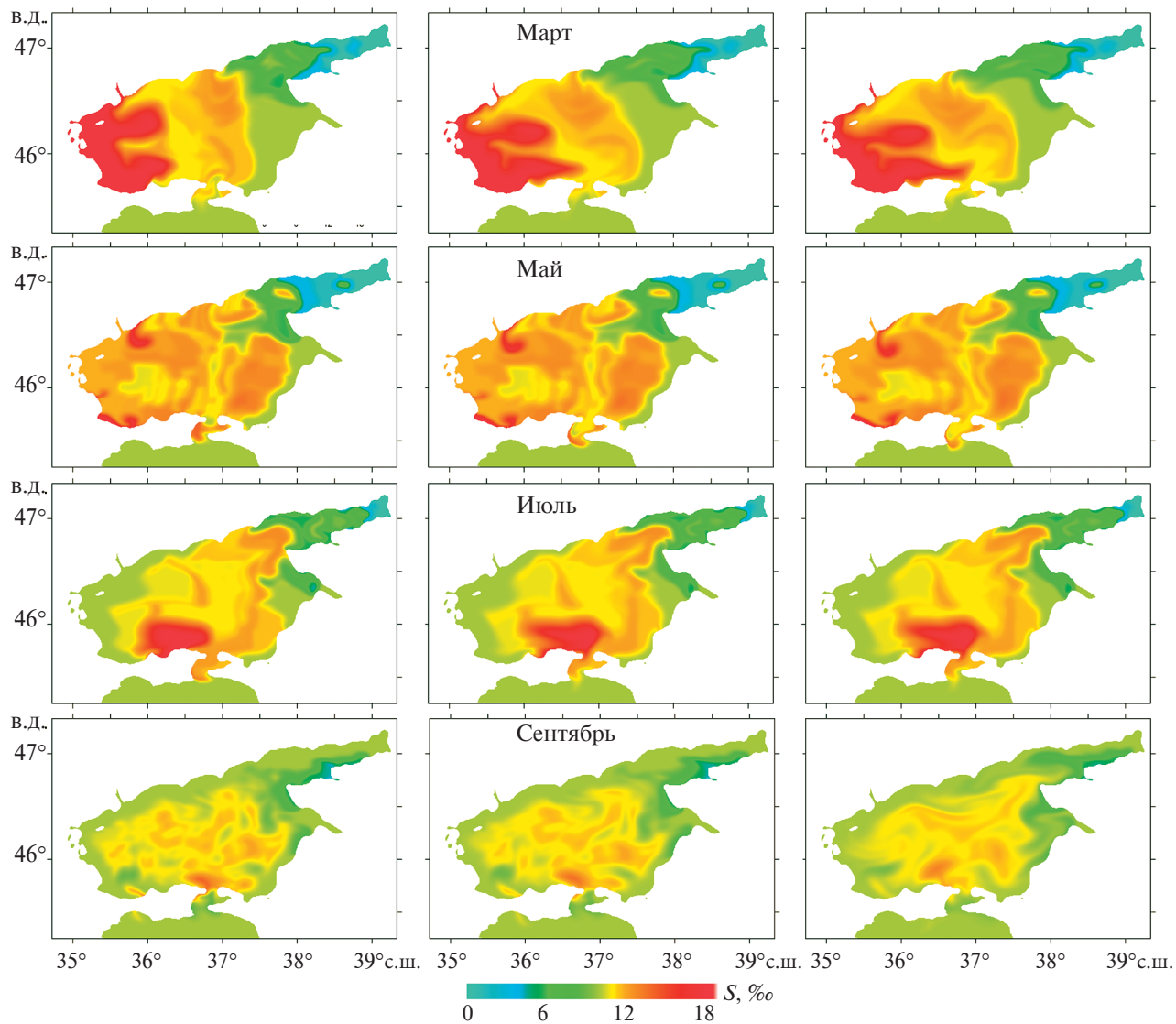


Рис. 6. Поля солености в Азовском море по данным моделирования с интервалом 15 суток в различные сезоны 2007 г.

Fig. 6. Salinity of the Sea of Azov according to simulation through of 15 days at some seasons in 2007.