

Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели

А. И. Мизюк^{1,*}, Г. К. Коротаев¹, А. В. Григорьев², О. С. Пузина¹,
П. Н. Лишаев¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

²Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Москва, Россия

*E-mail: artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 07.02.2019 г., после доработки – 05.04.2019 г.

Цель. Сокращение стока реки Дон до исторических минимумов, а также интенсивная циклоническая деятельность и аномальная адвекция черноморских вод привели к тому, что в 2014–2016 гг. в Таганрогском заливе наблюдались высокие значения солёности (до 12 ‰). При определенных гидрометеорологических условиях солёные воды могут проникать вглубь устья реки Дон. Поэтому исследование аномальных изменений гидротермодинамики в Азовском море является актуальной задачей, которую авторы предлагают решать методами математического моделирования.

Методы и результаты. Представлена методика проведения долгосрочных прогностических расчетов совместной динамики вод Черного, Азовского и Мраморного морей на основе вихреразрешающей конфигурации модели *NEMO*. В качестве атмосферного воздействия впервые для региона применялся реанализ нового поколения *ERA5*, имеющий достаточно высокое пространственное разрешение. В расчетах использовалась новая информация о речном стоке Дона и Кубани, а также адаптационные расчеты для получения начальных условий. Верификация результатов выполнена на основе данных наблюдений с береговых гидрометеорологических станций в Азовском море. Представлены некоторые результаты расчетов для периода с середины 2007 по 2016 гг. В бассейне Азовского моря выражен положительный тренд солёности. Коррекция граничных условий для потока тепла на поверхности позволила не подключать численную модель льда при проведении расчетов и воспроизвести адекватные значения температуры азовоморских вод.

Выводы. Численные эксперименты показали работоспособность разработанной региональной конфигурации для дальнейших исследований проблемы. Однако необходим более детальный анализ результатов в бассейне Черного моря. Учет основных внешних факторов в модели позволил воспроизвести положительный тренд солёности в бассейне Азовского моря. Результаты моделирования температуры косвенно согласуются с данными о ледовой обстановке.

Ключевые слова: численное моделирование циркуляции, Азовское море, *ERA5*, прогностические расчеты, Черное море, Эвксинский каскад.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-80025\18 «Опасные явления»).

Для цитирования: Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели / А. И. Мизюк [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 496–510. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-496-510

Long-Term Variability of Thermohaline Characteristics of the Azov Sea Based on the Numerical Eddy-Resolving Model

A. I. Mizyuk^{1,*}, G. K. Korotaev¹, A. V. Grigoriev², O. S. Puzina¹,
P. N. Lishaev¹

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

²Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia

*e-mail: artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Purpose. Decline of the river Don runoff to its historic minima, as well as intensive cyclonic activity and abnormal advection of the Black Sea waters led to the fact that in 2014–2016, very high salinity values (up to 12 psu) were observed in the Taganrog Bay. Under certain hydrometeorological conditions, salt water can penetrate deep into the river Don mouth. Therefore, study of changes in the Azov Sea hydrothermodynamics is rather an actual problem, which is proposed to be solved by numerical modeling.

Methods and Results. The paper represents the methodology for carrying out long-term model runs for joint dynamics of the Black, Azov and Marmara seas based on the eddy-resolving configuration of the NEMO model framework. A new-generation ERA5 reanalysis with a sufficiently high spatial resolution was used for the first time as a weather forcing for the region. New information on the rivers Don and Kuban' runoffs was used and adjustment simulations were done to obtain the initial conditions. The results were verified based on the data from coastal hydrometeorological stations in the Sea of Azov. Some results of model simulations for the period from mid 2007 to 2016 are represented. A positive salinity trend in the basin of the Azov Sea is well pronounced. Surface boundary conditions for the heat flux were corrected for the purpose of carrying out simulations with no ice modeling and reproducing adequate temperature values of the Azov Sea waters.

Conclusions. The performed numerical experiments showed applicability for the developed model regional configuration to further investigations. However, more detailed analysis of the results obtained for the Black Sea basin is required. Consideration of the basic external conditions in modeling made it possible to reproduce positive tendency of salinity in the Sea of Azov. The temperature simulation results indirectly agree with the sea ice data.

Keywords: numerical ocean modeling, Sea of Azov, ERA5, free-run simulations, verification, Black Sea, Exinus cascade.

Acknowledgments: the investigation is carried out at the RFBR financial support (grant No. 18-05-80025\18 "Dangerous phenomena").

For citation: Mizyuk, A.I., Korotaev, G.K., Grigoriev, A.V., Puzina, O.S. and Lishaev, P.N., 2019. Long-Term Variability of Thermohaline Characteristics of the Azov Sea Based on the Numerical Eddy-Resolving Model. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(5), pp. 438-450. doi:10.22449/1573-160X-2019-5-438-450

1. Введение

Азовское море известно уникально высокой рыбопродуктивностью, которая обеспечивается большим отношением объема речного стока к объему моря, определяющим низкую соленость его вод и высокую концентрацию биогенных веществ¹. Однако в последнее время наблюдаются заметные изменения гидрологического режима Азовского моря, обусловленные значительным сокращением стока рек (Дона, Кубани, Миуса и др.). В результате сокращения стока уменьшается перепад уровня Азовского и Черного морей,

¹ Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альмана. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 426 с.

что приводит к увеличению поступления соли из Черного моря через Керченский пролив и изменению общего баланса соленых и пресных вод в бассейне. Эти изменения особенно заметны в Таганрогском заливе, где в отдельные промежутки времени наблюдается значительное осолонение вод. При определенных гидрометеорологических условиях соленые воды проникают даже в устье реки Дон, где находится водозабор пресной воды. Помимо осолонения воды, в устье реки также наблюдается поступление продуктов жизнедеятельности некоторых морских организмов, развивающихся в новых гидрологических условиях. Качество воды, используемой для обеспечения населения, при этом может существенно снижаться.

Для Азовского моря характерна значительная пространственная неоднородность солености. На участке от дельты реки Дон до Керченского пролива соленость возрастает от 0,5–0,7 до 13–14 ‰. Самый резкий градиент солености закономерно формируется в эстуарном Таганрогском заливе. Здесь ярко проявляются внутривековые, сезонные и сгонно-нагонные вариации термохалинного режима. Сокращение стока реки Дон до исторического минимума, наряду с интенсивной циклонической деятельностью и аномальной адвекцией черноморских вод, привело к тому, что в 2014–2016 гг. в Таганрогском заливе наблюдалась аномально высокая соленость (до 12 ‰) [1]. Поэтому одна из важнейших прикладных задач – оценка такого опасного явления, как аномальное изменение гидротермодинамики и экосистемы бассейна под влиянием изменений речного стока и хозяйственной деятельности.

Эта задача может быть решена в системе прогноза гидрофизических параметров, которая позволила бы оценивать также характеристики качества воды. В настоящий момент систем, дающих информацию по Азовскому морю, нет либо их результаты не являются общедоступными. В системах прогноза состояния Мирового океана, например Службе по мониторингу состояния морской среды проекта Коперник² (*CMEMS*), пространственное разрешение очень грубое для исследования локальных особенностей циркуляции в Азовском море.

Одним из источников информации о гидрофизических полях Черного моря, водообмен с которым в значительной степени влияет на соленость азовоморских вод, является Центр морских прогнозов Морского гидрофизического института РАН (<http://mis.bsmfc.net>) [2]. Продукты данного центра предоставляются с разрешением 5 км. В работе [3] были предложены две региональные конфигурации для модели *NEMO* (*Nucleus for European Modeling of the Ocean*) [4], одна из которых имела аналогичное пространственное разрешение и позволяла выполнять совместные расчеты в бассейнах Азовского и Черного морей. Результаты численного моделирования, полученные в работе [3] с использованием отмеченной конфигурации, несмотря на недостаточное согласование со спутниковыми данными высокого разрешения, показали менее удовлетворительные количественные оценки водообмена через Керченский пролив, чем результаты моделирования с более высоким разрешением (2,5 км).

² URL: <http://marine.copernicus.eu/> (date of access: 01.10.2019).

При численном моделировании динамики вод Азовского моря хорошо воспроизводятся характеристики нагонов [5, 6]. Однако влиянием втока черноморских вод зачастую пренебрегают. Поэтому более перспективными для анализа долгопериодных изменений являются модели совместной циркуляции бассейнов [8] с хорошим разрешением для Керченского пролива.

В настоящей работе аналогичный подход на основе модели *NEMO* [4] реализуется для воспроизведения общей циркуляции и трендов гидрофизических параметров в морях Эвксинского каскада. Приведена последовательность операций для подготовки и проведения долгосрочных прогностических экспериментов. Работа состоит из введения и трех разделов. В разделе 2 описана доработанная региональная конфигурация для воспроизведения общей циркуляции в бассейнах так называемого Эвксинского каскада (Азовского, Черного и Мраморного морей). Приведены процедуры подготовки начальных и граничных условий для проведения численных экспериментов. В разделе 3 представлен предварительный анализ результатов долгопериодных прогностических расчетов для бассейна Азовского моря. Некоторые нюансы не могут быть представлены в полной мере в рамках данной работы, поэтому были опущены во избежание значительного превышения объема статьи. В обсуждении приведены результаты косвенного сопоставления численного моделирования со спутниковыми данными о покрытии льда.

2. Данные и методы

2.1. Исследуемая область и используемая модель общей циркуляции

Расчетный домен представляет собой квазирегулярную сетку, покрывающую бассейны Черного, Азовского и Мраморного морей с шагом $1/24^\circ \times 1/17^\circ$ в меридиональном и зональном направлениях соответственно (*BAMS24*) в системе координат *WGS84*, что соответствует $\sim 4,6$ км. Топография дна для конфигурации построена на основе цифрового массива батиметрии *EMODnet*³ (рис. 1).

Долгопериодные расчеты в настоящей работе выполняются с использованием фреймворка численного моделирования океана *NEMO* [4], гидродинамический блок которого основан на системе примитивных уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска и гидростатики. При выборе правой тройки локального ортогонального базиса \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} (\mathbf{i} направлен на восток, \mathbf{j} – на север, \mathbf{k} – вверх) система уравнений имеет вид

$$\frac{\partial \mathbf{U}_h}{\partial t} = - \left[(\nabla \times \mathbf{U}) \times \mathbf{U} + \frac{1}{2} \nabla (\mathbf{U}^2) \right]_h - f \mathbf{k} \times \mathbf{U}_h - \frac{1}{\rho_0} \nabla_h p + \mathbf{D}^U + \mathbf{F}^U, \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla (\mathbf{TU}) + D^T, \quad (4)$$

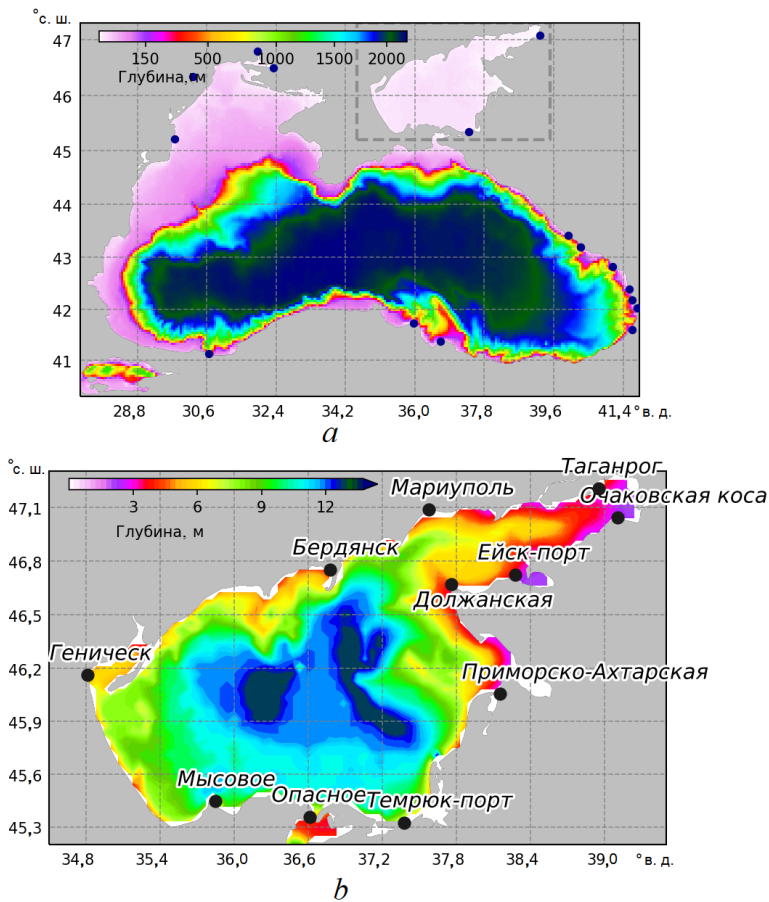
³ URL: <http://www.emodnet-bathymetry.eu> (date of access: 02.02.2018).

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\nabla(S\mathbf{U}) + D^S, \quad (5)$$

$$\rho = \rho(T, S, p), \quad (6)$$

$$\omega = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \mathbf{U}_h|_{z=\eta} \cdot \nabla_h(\eta) + P + R - E, \quad (7)$$

где η – уровень моря; P – осадки; R – сток рек; E – испарение; \mathbf{F}^U, F^T, F^S – члены, описывающие внешнее воздействие, вид которых будет приведен далее; $\mathbf{U} = \mathbf{U}_h + w\mathbf{k}$ – вектор скорости течений; индекс h означает проекцию вектора на плоскость \mathbf{Oij} , т. е. \mathbf{U}_h – горизонтальная скорость; $f = 2\mathbf{\Omega k}$ – параметр Кориолиса; $\mathbf{\Omega}$ – угловая скорость вращения Земли.



Р и с. 1. Расчетный домен конфигурации BAMS24: *a* – батиметрия (• – устья учитываемых в расчетах рек); *b* – увеличенное изображение выделенной области Азовского моря (• – положение береговых гидрометеорологических станций)

Fig. 1. Computation domain of the BAMS24 configuration: *a* – bathymetry (• – mouths of the rivers involved in calculations); *b* – enlarged image of the distinguished area of the Azov Sea (• – location of the coastal hydrometeorological stations)

Подсеточные процессы в уравнениях движения (1) (член \mathbf{D}^U) и переноса – диффузии тепла (4) и соли (5) (члены D^T и D^S соответственно) параметризуются следующим образом. Боковой турбулентный обмен представлен бигармоническим оператором с коэффициентами вязкости ($-5 \cdot 10^9$ м⁴/с) и диффузии тепла и соли ($-4 \cdot 10^8$ м⁴/с). Вертикальное перемешивание определяется уравнениями k - ϵ гипотезы замыкания [9]. При этом коэффициенты турбулентной диффузии и вязкости рассчитываются с использованием функции устойчивости, предложенной в работе [10]. В качестве уравнения состояния (6) используется формула ЮНЕСКО [11, с. 15]. Остальные обозначения в системе уравнений (1)–(7) общеприняты.

Дискретизация системы уравнений выполнена на сетке C по терминологии Аракавы [12]. При этом уравнения движения (1) имеют форму Громеки – Лэмба и аппроксимированы посредством схемы с сохранением энергии и энтропии. Для нелинейных слагаемых в уравнениях переноса – диффузии (4, 5) применяется схема TVD [13]. По вертикали используется z -координата с дробным шагом у дна, что несколько улучшает учет неровности батиметрии по сравнению с z -координатой с полным шагом, особенно в области резкого свала глубин. Положение горизонтов задается посредством аналитической функции, предложенной авторами модели. Отмеченного пространственного разрешения явно недостаточно в области пролива Босфор. Поэтому в данной работе на основе серии численных экспериментов искусственно уменьшался зональный размер ячейки («полузакрытая ячейка») для получения адекватных значений расхода через пролив.

Расчет уровня моря выполняется с учетом кинематического условия на поверхности моря (7) [14]. Используется схема расщепления по времени на баротропную (быструю) и бароклинную (медленную) моду. Шаг по времени для медленной моды – 5 мин, для быстрой – 10 с. Дискретизация по времени осуществляется посредством модифицированной схемы «чехарда» [15].

При численном интегрировании системы уравнений использовались следующие граничные условия. На твердых боковых границах для уравнений движения ставится условие скольжения. На дне задается нелинейное трение. В уравнениях переноса – диффузии тепла (соли) на боковых границах и дне ставятся условия отсутствия потоков и дополнительно равенство нулю лапласиана $T(S)$ на боковых границах.

В Мраморном море, западнее о-ва Мармара, ставятся граничные условия на открытой жидкой границе. Учитывается средняя за 10 лет внутригодовая изменчивость на базе продуктов *CMEMS*⁴: уровень и баротропный расход задается посредством схемы Флэттер (*R. Flather*), для профилей температуры и солёности используется метод релаксации потока.

2.2. Атмосферное воздействие

В качестве атмосферного воздействия в численных экспериментах используются поля температуры и влажности воздуха на уровне 2 м, компоненты

⁴ Global Ocean 1/12° Physics Analysis And Forecast Updated Daily. URL: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024 (date of access: 26.09.2018 г.).

горизонтальной скорости ветра на 10 м, потоки нисходящего длинноволнового и коротковолнового излучения, осадки в жидкой и твердой фазах из глобального атмосферного реанализа ERA5⁵, предоставляемого в настоящий момент на ограниченный период 2000–2017 гг. Это продукт последнего поколения от Центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), имеющий пространственное разрешение $1/4^\circ$ и полученный на основе более совершенной атмосферной модели, чем поколение продуктов ERA-Interim. Поля реанализа имеют разрешение по времени 1 ч, что может быть важно для воспроизведения короткопериодных (внутрисуточных) процессов, например сгонно-нагонных колебаний в Азовском море. Посредством балк-формул протокола CORE (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments) [16] отмеченные метеопараметры с исходной дискретностью по времени используются для расчета суммарных потоков тепла, массы и напряжения трения ветра.

Согласно формулам протокола, восходящий поток тепла с поверхности моря зависит от разности температур воды и воздуха. Отметим, что предварительный эксперимент показал нефизическое выхолаживание вод (местами до -10°C) на северо-западном шельфе Черного моря и в Азовском море, что ярко демонстрирует необходимость включения модели льда. Как видно из данных реанализа (рис. 2, а), температура в зимнее время может опускаться значительно ниже 0°C на длительные сроки. Это указывает на формирование льда в этих акваториях. Кроме того, это подтверждает анализ контактных измерений температуры и спутниковых снимков в зимний период. Поскольку целью первых прогностических расчетов была оценка трендов солёности, а модель льда требовала настройки значительного числа параметров, термодинамика льда не учитывалась. Вместо этого в численных экспериментах использовалась коррекция граничных условий на поверхности: в момент, когда вода достигает температуры замерзания (приблизительно $-0,06^\circ\text{C}$ для солёности азовоморских вод), ставится условие отсутствия потока тепла. Авторы отмечают, что таким образом могут быть получены только косвенные характеристики ледовой обстановки. Качественный анализ области, подверженной формированию ледового покрова, по результатам численного эксперимента представлен в обсуждении.

В бассейне Азовского моря важную роль играют сгонно-нагонные процессы. Поэтому здесь необходим учет поля атмосферного давления на уровне моря P_{atm} в качестве внешнего воздействия \mathbf{F}^U в уравнениях движения (1), что обычно выполняется посредством формулы обратного барометра:

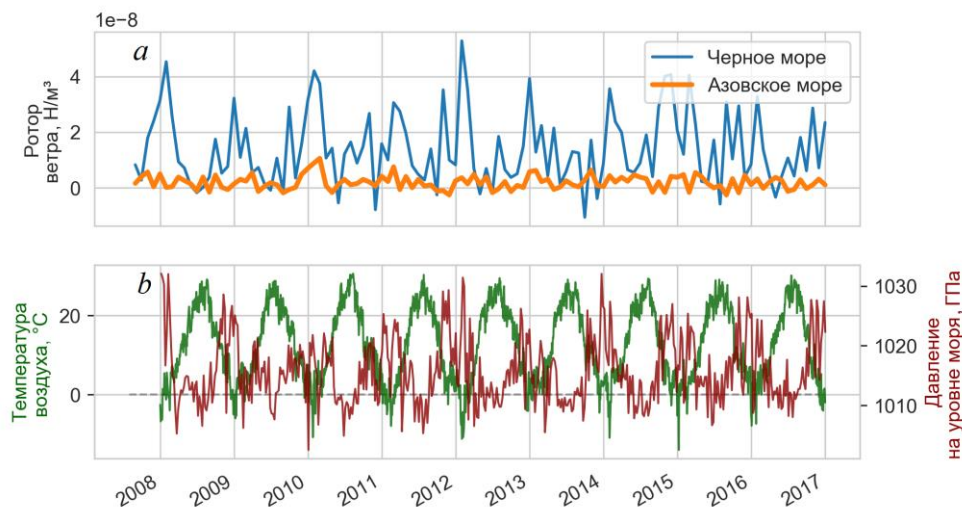
$$\eta_{ib} = -\frac{1}{g\rho_0}(P_{\text{atm}} - P_0), \quad (8)$$

где $P_0 = 101000$ Па.

Представление о межгодовой изменчивости среднего по бассейну ротора ветра, рассчитанного с использованием балк-формул протокола CORE в одном из экспериментов, дает рис. 2, а. Как видно, наиболее интенсивные ветры

⁵ Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/> (date of access: 26.09.2018 г.).

наблюдаются в зимнее время, что согласуется с предыдущими исследованиями. Важно отметить, что количественно значения ротора ветра достаточно высоки для воспроизведения адекватной циркуляции в Черном море. Следовательно, преимуществами, по сравнению с другим продуктом реанализа, используемыми ранее для подобных исследований, являются достаточно высокое разрешение и наличие непрерывного ряда, который будет расширен в ближайшее время.

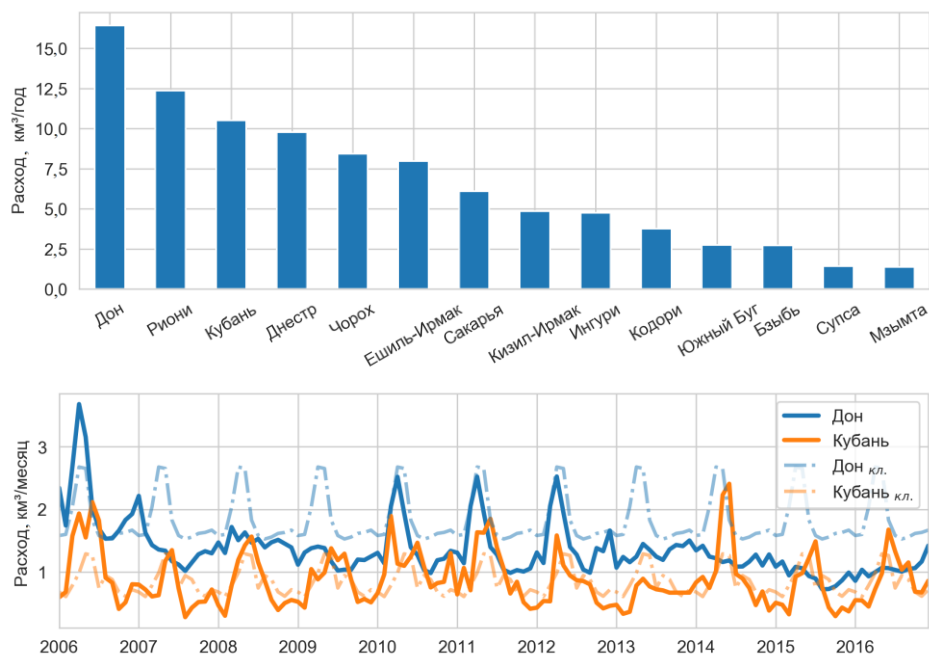


Р и с. 2. Граничные условия на поверхности по данным реанализа ERA5: *a* – усредненный по бассейнам Азовского и Черного морей ротор напряжения трения ветра; *b* – суточная изменчивость температуры воздуха и еженедельная изменчивость давления над бассейном Азовского моря

Fig. 2. Surface boundary conditions based on the ERA5 reanalysis data: *a* – curl of the wind tension averaged over the basins of the Azov and Black seas; *b* – diurnal variability of air temperature and weekly variability of pressure above the Azov Sea basin

2.3. Речной сток

В разработанной региональной конфигурации модели учитываются климатические расходы 16 рек. Расположение устьев представлено на рис. 1, *a*. В работе [17] задается в качестве граничных условий в реках сезонный ход температуры и малое значение солёности втекающих вод (2 ‰). Такой же подход затем был использован в работе [3]. Результаты предварительных численных экспериментов с заданием таких граничных условий показали значительное осолонение вод Азовского моря, плохо согласующееся с данными наблюдений. Поэтому в представленных прогностических расчетах в устьях рек значения температуры и солёности не задавались. На основе климатических значений объемного расхода рек бассейна Черного моря¹ (рис. 3, *a*) выполнялась коррекция значений солёности во всем столбе жидкости до дна в предположении, что речные воды имеют нулевую солёность. Температура воды не корректировалась. В бассейне Мраморного моря речной сток не учитывался.



Р и с. 3. Речной сток в прогностических расчетах: *a* – среднегодовой расход во всех реках, кроме р. Дунай ($\approx 202 \text{ км}^3/\text{год}$) и р. Днепр ($\approx 47 \text{ км}^3/\text{год}$); *b* – среднемесячный расход ($\text{км}^3/\text{мес}$) для рек азовоморского бассейна по данным наблюдений⁶ и климатические значения, используемые в работе [3]

F i g. 3. River runoff in the prognostic calculations: *a* – annual average discharge in all the rivers except for the rivers Danube ($\approx 202 \text{ km}^3/\text{year}$) and Dnieper ($\approx 47 \text{ km}^3/\text{year}$); *b* – monthly average discharge (km^3/month) for the rivers of the Azov Sea basin based on the observation data⁶ and the climatic values used in [3]

Точность результатов моделирования в бассейне Азовского моря можно повысить, если учитывать реальные изменения речного стока водного баланса. С этой целью были привлечены данные наблюдений⁶ объемного стока рек Дон и Кубань (рис. 3, *b*). Для сравнения представлены климатические данные, использованные в предыдущих версиях численных экспериментов [3]. Как видно, значения расхода реки Дон с 2013 г. снижаются. Локальный минимум наблюдается летом 2015 г.: климатические значения в этом сезоне в два раза выше. Осенью того же года наблюдается локальный минимум расхода реки Кубани, в поведении которого также выражен тренд на снижение с 2006 г.

2.4. Начальные условия

Важной задачей при моделировании квазиреальных гидрофизических полей в расчетах без ассимиляции данных является подготовка начальных условий. Азовское море достаточно мелкий бассейн, и адаптация температуры

⁶ Основные гидрологические характеристики морских устьев рек европейской территории России [Электронный ресурс] : База данных / В. Ф. Полонский, Л. П. Остроумова ; ФГБУ «ГОИН». Электрон. дан. Москва, 2018. № гос. регистрации 2012620681.

к атмосферному воздействию пройдет достаточно быстро. Отметим здесь, что численные эксперименты удобно начинать в период отсутствия льда (с ранней весны по середину декабря).

Соленость – параметр, зависящий от большого числа внешних параметров, таких как водообмен через Керченский пролив, сток рек, осадки и испарение. Поэтому поле начальной солености должно быть максимально приближено к наблюдениям.

Начальные поля температуры и солености в Азовском море построены посредством оптимальной интерполяции наблюдений *in situ* из объединенного массива обработанных данных по Черному морю службы *CMEMS*⁷ и океанографической базы *SeaDataNet* (Европейской инфраструктуры управления океанскими и морскими данными) (<https://www.seadatanet.org/>). Для получения климатических полей все станции, выполненные в данном месяце, были отнесены к его середине. Наибольшая обеспеченность данными наблюдений пришлась на август.

Поскольку стояла задача воспроизвести тренд за последние минимум 10 лет, за начальный мы приняли 2007 год. Для бассейна Черного моря в качестве начальных условий взяты поля температуры и солености из реанализа гидрофизических параметров Центра морских прогнозов Черного моря (ЦМП ЧМ) (<http://mis.bsmfc.net>) за 15 августа 2007 г., а для Мраморного моря – из глобального анализа службы *CMEMS*⁴ за ту же дату.

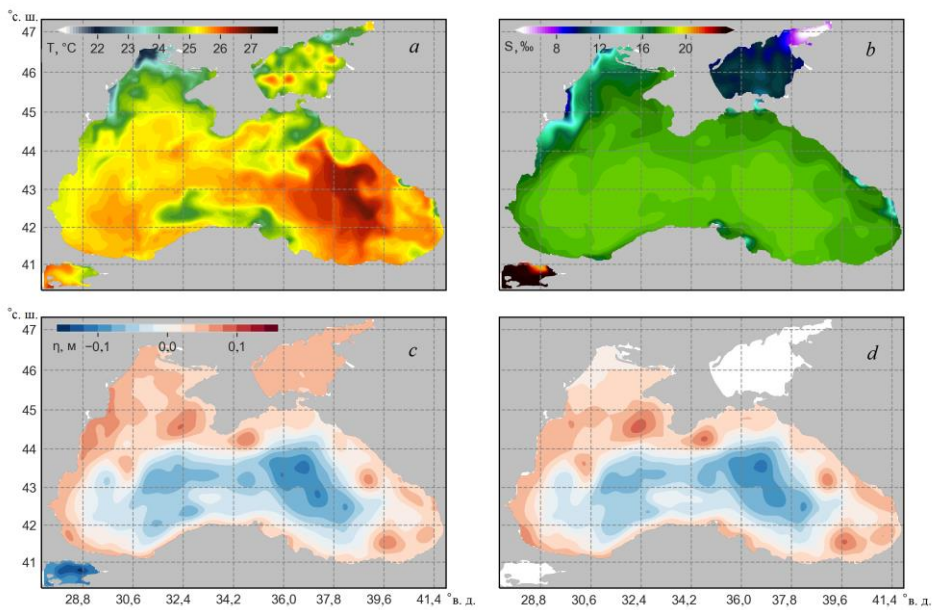
Полученные поля T_0 и S_0 были проинтерполированы на сетку домена посредством линейной интерполяции по вертикали и билинейной по горизонтали с экстраполяцией небольшого числа прибрежных точек сетки для согласования с расчетными ячейками моря.

Отметим, что опыт ранее проведенных прогностических расчетов с использованием полей температуры и солености и полей нулевых скоростей течений (в состоянии покоя) в качестве начальных условий показал ярко выраженный период адаптации модели, составивший порядка трех месяцев [3]. Поэтому предварительно проводился адаптационный расчет, идея которого предложена академиком А. С. Саркисяном: по фиксированным полям T_0 и S_0 восстанавливаются поля скоростей течений и уровня. Для этого в правые части уравнений (4)–(5) включаются источники F^T и F^S , которые имеют вид $F^T = -\gamma(T - T_0)$ и $F^S = -\gamma(S - S_0)$, где γ – параметр, обратный периоду релаксации (параметр релаксации), равному 12 ч. Для других компонентов вектора состояния моря используются нулевые начальные условия (состояние покоя). Таким образом, поля температуры и солености в ходе эксперимента согласуются между собой, а скорости течений будут адаптированы к результирующему полю плотности.

Результаты адаптационного расчета демонстрирует рис. 4. В представленных термохалинных полях (рис. 4, *a*, *b*) можно выделить как мезомасштабные структуры, так и элементы общей циркуляции. Хорошо выражены области стока рек (например, значительно распреснен Таганрогский залив,

⁷ Black Sea- In-Situ Observations Yearly Delivery in Delayed Mode. URL: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=INSITU_BS_TS_REP_OBSERVATIONS_013_042 (date of access: 01.10.2019).

видна область черноморских вод в бассейне Мраморного моря). За счет работы численной модели в гидрофизических полях сглажены области скачка, которые возникают в результате процедуры интерполяции. Кроме того, в численном эксперименте реконструированы адаптированные поля скоростей течений и уровня моря (рис. 4, *c*). Как видно, структура поля уровня соответствует результатам реанализа ЦМП ЧМ: положение и интенсивность мезомасштабных вихрей справа от Основного Черноморского течения (ОЧТ) хорошо согласуются (рис. 4, *c*, *d*). Хорошо выражен перепад уровня между Азовским и Черным морями, формирующий течение в Керченском проливе, а также перепад между Черным и Мраморным морями.



Р и с. 4. Адаптированные для прогностических расчетов поля начальных условий (15 августа 2007 г.): *a* – поверхностной температуры и *b* – поверхностной солёности; *c* – уровня моря; *d* – уровня моря из реанализа ЦМП ЧМ 15 августа 2007 г. (шкалы на рис. 4, *c* и 4, *d* аналогичны)

Fig. 4. Fields of initial conditions (August 15, 2007) adapted for the prognostic calculations for: *a* – surface temperature and *b* – surface salinity; *c* – sea level; *d* – sea level from the BS CMF reanalysis for August 15, 2007 (the scale is analogous to that in Fig. 4, *c*)

2. Результаты прогностических расчетов

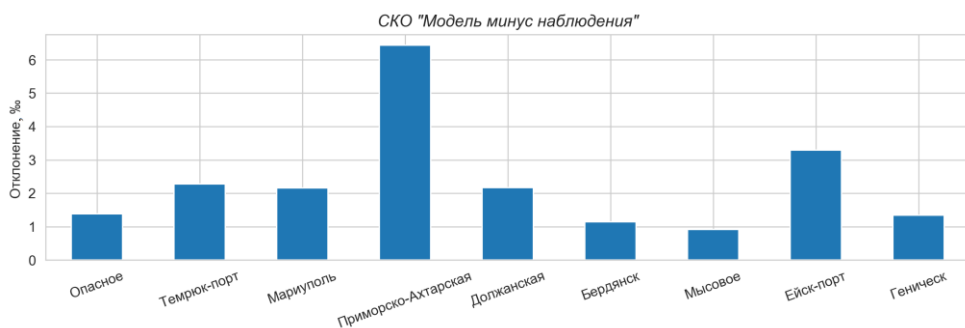
О положительном тренде солёности в различных частях бассейна Азовского моря свидетельствуют данные наблюдений с ГМС (рис. 5). Важно отметить, что начальная оценка поля солёности, полученная в разделе 2.4, количественно оказалась близкой к наблюдениям, используемым для верификации. Качественно результаты моделирования воспроизводят поведение со временем солёности на всех станциях. Например, воспроизводятся отдельные локальные максимумы (рис. 5, *a*), а также поведение средних трендов без учета короткопериодной изменчивости (рис. 5, *b*).



a



б



в

Рис. 5. Сравнение результатов моделирования и наблюдений солёности на станциях Темрюк-порт (*a*), Генчешек (*b*) и в ближайшей к станции точке по результатам численного моделирования; среднеквадратичные отклонения «модель минус наблюдения» (*c*) в 2008–2016 гг.

Fig. 5. Comparison of the results of salinity modeling and observations at the stations Temryuk-port (*a*), Genichesk (*b*) and in the point closest to the station based on the numerical modeling results; rms deviations “model minus observations” (*c*) in 2008–2016

На станции Генчешек наблюдаются значительные вариации солёности (размах до 8 ‰), вероятной причиной которых является поступление высоко-солёных вод из залива Сиваш, а также поток соли в период формирования льда (рис. 5, *b*). Поведение солёности по результатам численного моделирования лишь качественно воспроизводит ее рост. Динамика в прибрежной области этой станции при выбранном разрешении не может быть адекватно смоделирована. Отметим, что максимальные значения среднеквадратических

отклонений (СКО) «модель минус наблюдения» наблюдаются также на станциях, лежащих возле лиманов или в приустьевых областях (Приморско-Ахтарск, Ейск, Темрюк) (рис. 5, с), что может вызывать значительные отклонения на коротких временных масштабах. В целом же по станциям количественное согласование солёности по результатам моделирования и наблюдения можно охарактеризовать как удовлетворительное.

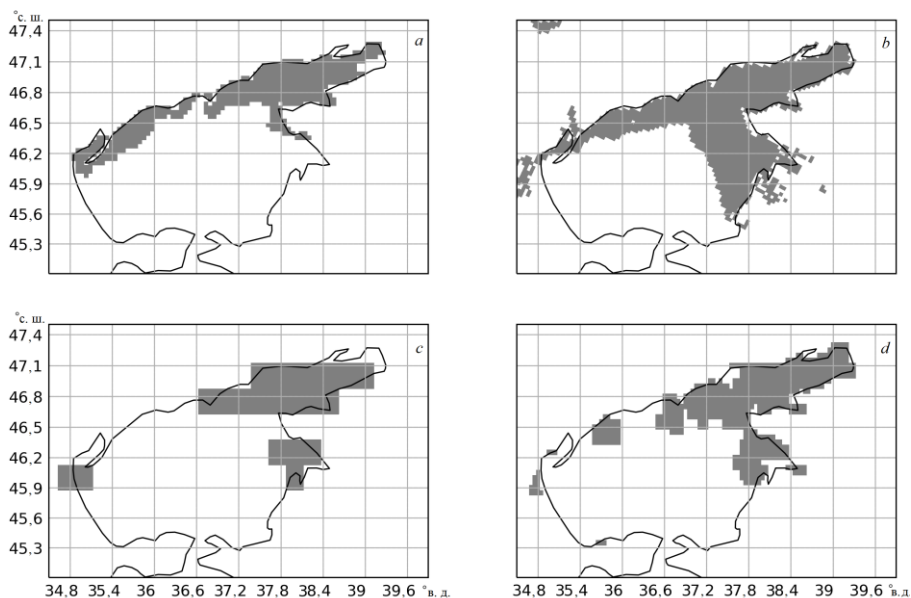
Выполнено аналогичное сопоставление полей температуры. Качественно и количественно поведение температуры по результатам численного моделирования хорошо согласуется с наблюдениями на ГМС. Летние максимумы температуры воспроизводятся моделью во все годы, кроме 2008 и 2010 гг. Длительность периода зимнего выхолаживания также соответствует измерениям. Максимальные СКО «модель минус наблюдения» наблюдаются на станциях Тамань и Очаковская коса. Как отмечалось выше, пространственное разрешение численной модели недостаточно для воспроизведения циркуляции в таких акваториях.

3. Результаты исследования и их обсуждение

В настоящей работе представлена первая попытка проведения долгопериодных численных экспериментов по моделированию совместной циркуляции вод Черного, Азовского и Мраморного морей с использованием продукта ERA5 (атмосферного реанализа нового поколения от ECMWF) и новой региональной конфигурации модели NEMO.

Гидрофизические поля в бассейнах Эвксинского каскада по результатам моделирования качественно согласуются с полученными ранее представлениями о циркуляции в бассейнах. Предполагается более детальный анализ гидрофизических полей Черного и Мраморного морей. Проведенное сопоставление результатов численного моделирования с наблюдениями в Азовском море показало, что термохалинные характеристики в выполненных прогностических экспериментах количественно воспроизводятся весьма удовлетворительно. Наиболее важная особенность, которой удалось добиться при численном моделировании, – воспроизведение положительного тренда солёности азовоморских вод. Отметим, что он воспроизведен, несмотря на недостаточное пространственное разрешение разработанной региональной конфигурации модели.

Использование искусственной коррекции потока тепла на поверхности позволило воспроизвести вариации температуры в различных точках Азовского моря в зимний период. Полученные результаты при определении положения изолинии температуры замерзания (приблизительно $-0,06$ °C) позволяют косвенно оценить положение кромки льда в бассейне (рис. 6). Как видно, конфигурация предположительного ледового поля в численных экспериментах согласуется с другими источниками информации по ледовому покрытию [18, 19].



Р и с. 6. Оценки положения кромки льда (серая область) в бассейне Азовского моря по данным: *a* – численного моделирования (контур температуры замерзания воды); *b* – *Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS)* [16] (разрешение 4 км); *c* – *ERA5*⁵ (разрешение 0,25°), *d* – *OSTIA* [19] (разрешение 0,05°)

F i g. 6. Estimates of location of the ice edge (grey area) in the Azov Sea basin based on the data of: *a* – numerical modeling (temperature contour of water freezing); *b* – *Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS)* [26] (resolution 4 km), *c* – *ERA5*⁵ (*sea ice cover*) (resolution 0.25°), *d* – *OSTIA* [19] (resolution 0.05°)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матишов Г. Г., Григоренко К. С.* Причины осолонения Таганрогского залива // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477, № 1. С. 92–96. doi:10.7868/S086956521731019X
2. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system / G. K. Korotaev [et al.] // *Ocean Science*. 2011. Vol. 7, iss. 5. P. 629–649. <https://doi.org/10.5194/os-7-629-2011>
3. Features of the horizontal variability of the sea surface temperature in the Western Black Sea from high resolution modeling / A. I. Mazyuk [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 5. P. 570–578. <https://doi.org/10.1134/S0001433816050108>
4. NEMO ocean engine / G. Madec [et al.]. IPSL, 2016. 386 p. (Note du pôle de modélisation IPSL, № 27). URL: <http://www.nemo-ocean.eu/doc/> (date of access: 10.09.2019).
5. *Попов С. К., Лобов А. Л.* Диагноз и прогноз наводнения в Таганроге по оперативной гидродинамической модели // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. М. : ТРИАДА ЛТД, 2016. Вып. 362. С. 92–108.
6. *Фомин В. В., Дианский Н. А.* Расчет экстремальных нагонов в Таганрогском заливе с использованием моделей циркуляции атмосферы и океана // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 12. С. 69–80.
7. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov / V. B. Zalesny [et al.] // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2012. Vol. 27, iss. 1. P. 95–112. <https://doi.org/10.1515/rnam-2012-0006>
8. *Stanev E. V., Grashorn S., Zhang Y. J.* Cascading ocean basins: numerical simulations of the circulation and interbasin exchange in the Azov-Black-Marmara-Mediterranean Seas system // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 67, iss. 8. P. 1003–1025. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1071-2>

9. *Rodi W.* Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1987. Vol. 92, iss. C5. P. 5305–5328. <https://doi.org/10.1029/JC092iC05p05305>
10. Ocean turbulence. Part I: One-point closure model – momentum and heat vertical diffusivities / *V. M. Canuto [et al.]* // *Journal of Physical Oceanography*. 2001. Vol. 31, no. 6. P. 1413–1426. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<1413:OTPIOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<1413:OTPIOP>2.0.CO;2)
11. *Fofonoff N. P., Millard R. C.* Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO, 1983. (Unesco technical papers in marine science, no. 44).
12. *Mesinger F., Arakawa A.* Numerical Methods Used in Atmospheric Models. Vol. 1. Geneva : WMO-ICSU Joint Organizing Committee, 1976. 76 p. (GARP Publication Series, no. 17).
13. *Zalesak S. T.* Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids // *Journal of Computational Physics*. 1979. Vol. 31, iss. 3. P. 335–362. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(79\)90051-2](https://doi.org/10.1016/0021-9991(79)90051-2)
14. *Roullet G., Madec G.* Salt conservation, free surface, and varying levels: A new formulation for ocean general circulation models // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2000. Vol. 105, iss. C10. P. 23927–23942. <https://doi.org/10.1029/2000JC900089>
15. *Leclair M. and Madec G.* A conservative leapfrog time stepping method // *Ocean Modelling*. 2009. Vol. 30, iss. 2–3. P. 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.06.006>
16. *Large W. G., Yeager S. G.* Diurnal to Decadal Global Forcing for Ocean and Sea-Ice Models: the Data Sets and Flux Climatologies. Boulder, USA : CGD Division of the National Center for Atmospheric Research, 2004. (NCAR Technical Note, NCAR/TN-460+STR). doi:10.5065/D6KK98Q6
17. *Кубряков А. И.* Применение технологии вложенных сеток при создании системы мониторинга гидрофизических полей в прибрежных районах Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. Вып. 11. С. 31–50.
18. IMS Daily Northern Hemisphere Snow and Ice Analysis at 1 km, 4 km, and 24 km Resolutions, Version 1. [4 km]. Boulder, USA : NSIDC, 2008. <https://doi.org/10.7265/N52R3PMC>
19. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system / *C. J. Donlon [et al.]* // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 116. P. 140–158. doi:10.1016/j.rse.2010.10.017

Об авторах:

Мизюк Артем Игоревич, старший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4885-354X**, **ResearcherID: C-6125-2016**, artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Корогаев Геннадий Константинович, научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: K-3408-2017**, gkorotaev@gmail.com

Григорьев Александр Валентинович, ведущий научный сотрудник, отдел численного моделирования гидрофизических процессов, лаборатория гидродинамики прибрежной зоны, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (119034, Россия, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9630-3986**, ag-privat@mail.ru

Пузина Оксана Сергеевна, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-1637-4475**, oksana_puzina@mhi-ras.ru

Лишаев Павел Николаевич, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 57193071072**, pavellish@mail.ru