


## Особенности водообмена между бассейнами Черного и Мраморного морей по результатам численного моделирования с упрощенным представлением пролива

А. И. Мизюк , Г. К. Коротаев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
 [artem.mizyuk@mhi-ras.ru](mailto:artem.mizyuk@mhi-ras.ru)

Поступила в редакцию 20.05.2024; одобрена после рецензирования 28.06.2024;  
принята к публикации 13.07.2024.

### Аннотация

**Цель.** Анализируется адекватность воспроизведения процессов массо-, тепло- и солепереноса через пролив Босфор по результатам численного моделирования совместной циркуляции вод Эвксинского каскада с упрощенным описанием пролива, обусловленным пространственным разрешением используемой модели.

**Методы и результаты.** В работе используется региональная конфигурация модели *NEMO* с пространственным разрешением около 1 км, позволяющая воспроизводить мезо- и субмезомасштабную изменчивость гидрофизических полей в морях Эвксинского каскада. Кратко представлено ее описание. Численный эксперимент выполнен для периода 2008–2009 гг. Реконструированные в ходе эксперимента поля солёности и скоростей течений в сечении пролива подтверждают наличие двуслойной структуры циркуляции вод – верхне- и нижнебосфорского течений. Кроме того, они демонстрируют наличие периодов полной или частичной блокировки как верхнего, так и нижнего течений. Несмотря на грубую конфигурацию пролива, воспроизведенные в нем особенности солеобмена хорошо согласуются с аналогичными, но полученными на основе конечно-элементной модели с более высокой пространственной детализацией в проливе, и несколько хуже согласуются по температуре. В то же время, реконструированные скорости течений показали довольно точное соответствие событий блокировки при сопоставлении с измерениями, выполненными ранее.

**Выводы.** Подтвержден ранее установленный механизм поддержания верхнебосфорского течения в зимний период, обусловленный подъемом уровня Черного моря в прибосфорском районе, вследствие интенсификации ОЧТ. Модель качественно верно описывает реакцию пролива на изменения как ветрового воздействия, так и плотности морской воды в окрестности северного и южного входов в пролив. Блокировки верхнебосфорского течения происходят и могут быть вызваны интенсификацией течений в Мраморном море, обусловленных ветровым воздействием, и последующим ослаблением ОЧТ. При ослаблении мраморноморской циркуляции в зимне-весенний период можно наблюдать обратные явления, при которых наблюдаются события блокировки нижнебосфорского течения.

**Ключевые слова:** численное моделирование, Черное море, Босфор, Мраморное море, солеобмен, высокое разрешение

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ 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».


Для цитирования: Мизюк А. И., Коротаев Г. К. Особенности водообмена между бассейнами Черного и Мраморного морей по результатам численного моделирования с упрощенным представлением пролива // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 752–765. EDN FXYCFW.

Original article

## Features of Water Exchange between the Black and Marmara Sea Basins Based on the Results of Numerical Simulation with a Simplified Representation of the Strait

A. I. Mizyuk , G. K. Korotaev

*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

 [artem.mizyuk@mhi-ras.ru](mailto:artem.mizyuk@mhi-ras.ru)

### Abstract

**Purpose.** The study is purposed at analyzing the adequacy of reconstruction of mass, heat and salt transfer processes through the Bosphorus Strait based on the results of numerical simulation of joint circulation of the Euxine Cascade waters involving a simplified description of the strait due to the model spatial resolution.

**Methods and Results.** A regional configuration for the *NEMO* model (spatial resolution is about 1 km) which allows simulating the meso- and submeso-scale variability of hydrophysical fields in the Euxinus cascade seas is used. It is briefly described. The numerical experiment covers the period 2008–2009. The salinity and current velocity fields in the strait cross-section reconstructed in the experiment confirm a two-layer structure of water circulation, i.e. the presence of upper and lower Bosphorus currents. Besides, they show the availability of periods of complete or partial blocking both the upper and lower currents. Despite a somewhat rough configuration of the strait, the reconstructed salt exchange features are in good agreement with the similar ones obtained on the basis of a finite-element model with a higher spatial detailing in the strait, and as for temperature, the agreement is to some extent worse. At the same time, the reconstructed current velocities show a fairly accurate correspondence of the blocking events when compared to the earlier performed measurements.

**Conclusions.** The previously revealed mechanism for maintaining the upper Bosphorus Current in winter conditioned by a rise of the Black Sea level in the Bosphorus region due to the Rim Current intensification has been confirmed. The model qualitatively correctly describes the strait response to the changes both in wind forcing and seawater density in the vicinity of the northern and southern inlets to the strait. Blockings of the upper Bosphorus Current occur and can be induced by the intensification of currents in the Marmara Sea due to the wind forcing and subsequent weakening of the Black Sea Rim Current. In the winter-spring period, the Marmara Sea circulation weakens, and one can observe the reverse phenomena in which the lower Bosphorus current blockings take place.

**Keywords:** numerical modeling, Black Sea, Bosphorus, Sea of Marmara, salt exchange, high resolution

**Acknowledgements:** The study was carried out within the theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0012 “Analysis, hindcast and operational forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine water areas based on numerical modeling using the data of remote and *in situ* measurement methods”.

**For citation:** Mizyuk, A.I. and Korotaev, G.K., 2024. Features of Water Exchange between the Black and Marmara Sea Basins Based on the Results of Numerical Simulation with a Simplified Representation of the Strait. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 707-719.

### Введение

Водообмен через пролив Босфор двояко влияет на режим Черного моря. Прежде всего, совместно с речным стоком, осадками и испарением, а также

с Керченским проливом он формирует водный и солевой баланс бассейна. Характерный масштаб времени этого процесса определяется отношением объема вод Черного моря к величине расхода через проливы и составляет несколько сотен лет.

Последние наблюдения свидетельствуют, однако, что поступающие через проливы воды дают также вклад в мезомасштабную изменчивость полей бассейна. Это проявляется в распространении на большие расстояния объемов жидкости, отличающихся по своим свойствам от окружающих вод [1].

Можно предположить, что требования к модели пролива различны в зависимости от временного масштаба исследуемого явления. При моделировании многолетних изменений стратификации Черного моря для достижения аккуратного количественного описания водообмена необходимо стараться воспроизвести геометрию проливов с как можно большей подробностью. Иначе небольшие неточности в воспроизведении потоков соли через проливы при длительном интегрировании будут накапливаться с течением времени и искажать тренды эволюции полей бассейна. Детальное описание геометрии проливов требует значительного измельчения расчетной сетки [2]. Однако чтобы сохранить разумное время расчетов, в отмеченной работе авторы загрузили разрешение модели для открытой части Черноморского бассейна.

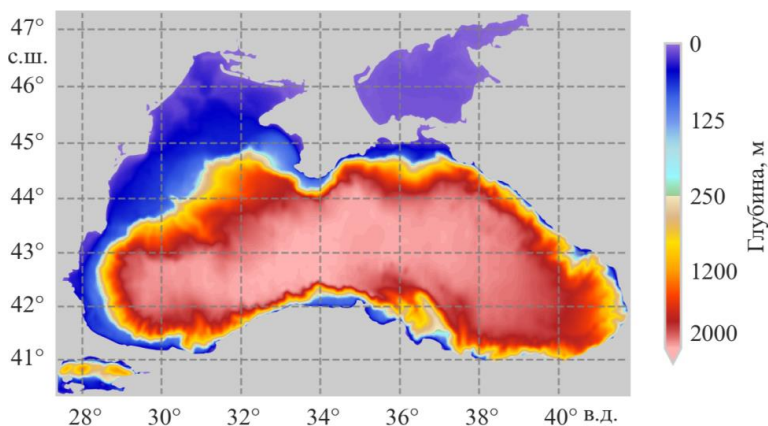
В то же время для исследования вклада водообмена через проливы в мезомасштабную изменчивость полей Черного моря, как представляется, возможно использовать более грубое описание проливов по сравнению с работой [2].

Отметим также, что пространственного разрешения около 1 км должно быть достаточно для адекватного воспроизведения динамики вод Мраморного моря [3]. В настоящей работе ставится цель продемонстрировать, что более простое описание пролива, которое получается при использовании сетки с таким разрешением, позволяет тем не менее воспроизводить в нем существенные особенности временной изменчивости процессов массо-, тепло- и солепереноса. Таким образом, появляется возможность моделирования вклада водообмена через пролив в относительно высокочастотную изменчивость полей Черного моря. Выбор соответствующего пространственного разрешения модели позволяет адекватно описать изменчивость полей Черного моря, вызванную распространением поступающих через пролив соленых средиземноморских вод.

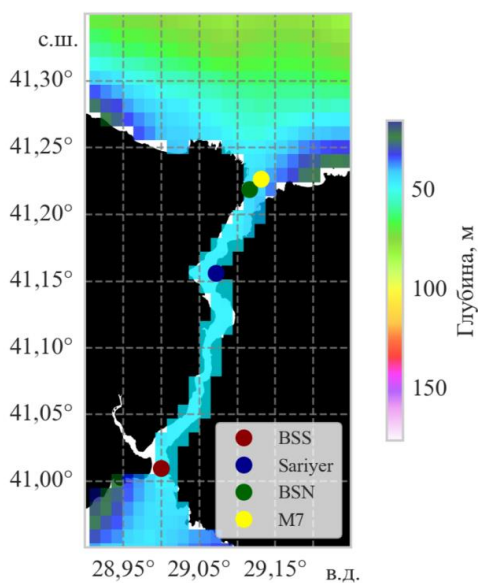
### Материалы и методы

В работе используются результаты, полученные в региональной конфигурации комплекса междисциплинарного моделирования компонентов океанских (морских) систем *Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO)* [4] с высоким пространственным разрешением, позволяющей воспроизводить мезо- и субмезомасштабную изменчивость гидрофизических полей в морях Эвксинского каскада. Расчетный домен представляет собой квазирегулярную сетку, покрывающую бассейны Мраморного, Черного и Азовского морей с шагами  $1/96^\circ \times 1/69^\circ$  в меридиональном и зональном направлениях соответственно [5]. Разрешение приблизительно соответствует 1,157 км в меридиональном направлении. В зональном направлении шаг меняется равномерно от

1100 м на севере до 1230 м на юге. Топография дна построена на основе цифрового массива рельефа дна *EMODnet*<sup>1</sup> (рис. 1, *a*).



*a*



*b*

**Рис. 1.** Топография дна для региональной конфигурации *NEMO*: для всего расчетного домена (*a*) и в акватории пролива (*b*). Конфигурация берегов в проливе приведена по данным сайта <https://www.openstreetmap.org/>; точками на фрагменте *b* отмечены положения станций по аналогии с работой [2]: *BSS* – *Bosphorus Strait South*, *Sariyer* – мыс Сарьер, *BSN* – *Bosphorus Strait North*; станция *M7* взята из работы [6]

**Fig. 1.** Bottom topography for the *NEMO* regional configuration: for the entire numerical domain (*a*) and the strait water area (*b*). Configuration of the strait coasts is given according to the data from <https://www.openstreetmap.org/>; dots on fragment *b* indicate the station positions by analogy with [2]: *BSS* – *Bosphorus Strait South*, *Sariyer* – Cape Sarrier, *BSN* – *Bosphorus Strait North*; station *M7* is taken from [6]

<sup>1</sup> URL: <http://www.emodnet-bathymetry.eu> (date of access: 16.10.2016).

Моделирование водообмена через Босфор является сложной задачей ввиду существенной разницы пространственных масштабов процессов, развивающихся в проливе и в соединяемых им бассейнах. Тем не менее с использованием данного комплекса и с учетом принятой дискретизации по пространству возможно проводить расчеты в области пролива и, таким образом, рассматривать совместную динамику Черного и Мраморного морей. В построенной топографии конфигурация пролива учитывалась грубо (рис. 1, *b*, *c*), учитывалось только положение основных порогов у северного и южного входа в пролив. При этом глубина в проливе задавалась равной 48,5 м.

Гидродинамический блок комплекса основан на системе уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости, подробно описанной в [4]. Конечно-разностные аналоги уравнений реализованы для произвольной квазиортогональной сетки по шаблону «С» по терминологии Аракавы. Дискретизация по времени осуществляется посредством модифицированной схемы «чехарда» [7].

Для описания перемешивания по вертикали используется модель  $k$ - $\epsilon$  уровня замыкания 2 [8]. Обмен по горизонтали описывается бигармоническим оператором, действующим вдоль поверхности геопотенциала, с отрицательными коэффициентами вязкости и диффузии тепла и соли, равными по модулю  $4 \times 10^7$  и  $8 \times 10^6$  м<sup>4</sup>/с соответственно. В качестве уравнения состояния применяется формула ЮНЕСКО<sup>2</sup>. Конфигурация, используемая в настоящей работе, фактически является «даунскейлингом» конфигурации с разрешением  $1/24^\circ$ , приведенной в работе [9]. Отличия заключались главным образом в параметрах горизонтального турбулентного обмена и в шаге по времени, который в данной работе составляет 60 с.

Задание граничных условий на поверхности выполнено на основе полей температуры и влажности воздуха на высоте 2 м, компонент горизонтальной скорости ветра на высоте 10 м, потоков нисходящего длинноволнового и коротковолнового излучения, осадков в жидкой и твердой фазах, полученных из глобального атмосферного реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) последнего поколения ERA5<sup>3</sup>. Этот продукт имеет достаточно высокое пространственное ( $1/4^\circ$ ) и временное (1 ч) разрешение, что может быть весьма важно для воспроизведения короткопериодных (внутрисуточных) процессов и дневного хода. Отмеченные метеопараметры с исходной дискретностью по времени использовались для расчета суммарных потоков тепла, массы и напряжения трения ветра посредством балк-формул протокола *Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (CORE)*.

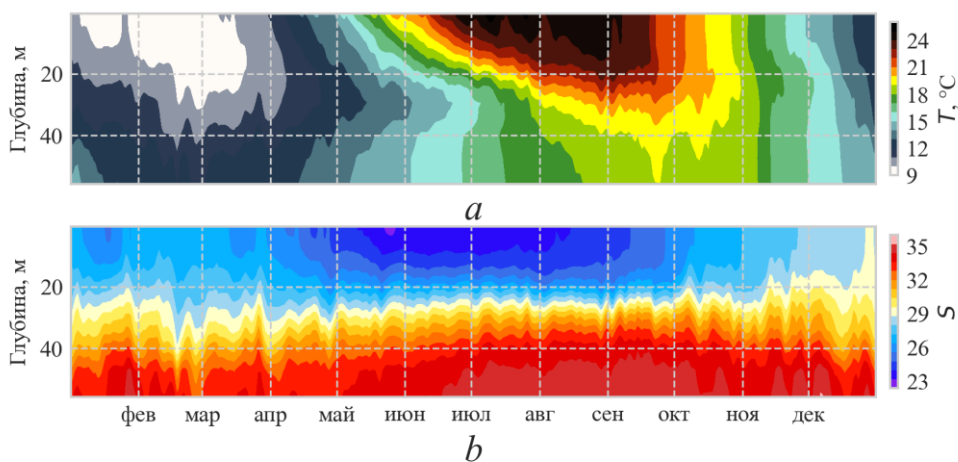
---

<sup>2</sup> Fofonoff N. P., Millard Jr, R. C. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater. Paris, France : UNESCO, 1983. 53 p. (UNESCO Technical Papers in Marine Sciences ; vol. 44). <https://doi.org/10.25607/OBP-1450>

<sup>3</sup> ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate // Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS) : site. 2017. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/> (date of access: 22.08.2018).

В настоящей работе не ставилась цель полного учета процесса ледообразования в зимний период. Для воспроизведения адекватных значений температуры на северо-западном шельфе Черного моря и в Азовском море использовалась коррекция потока тепла: при достижении температуры замерзания на поверхности ставится условие отсутствия потока тепла, что формально позволяет не описывать формирование ледяных полей.

Для бассейна Мраморного моря западнее о. Мармара (приблизительно вдоль  $27,38^\circ$  в. д.) задаются условия на открытой жидкой границе. Граничные условия для температуры и солености, уровня и скоростей течений были получены на основе ежесуточных продуктов Службы мониторинга состояния морской среды проекта Коперник (*Copernicus Marine Environment Monitoring System, CMEMS*)<sup>4</sup>. Для этого по данным анализа за 2007–2016 гг. были получены среднемноголетние климатические значения (рис. 2). Отметим, что в температуре ярко выражен период зимнего выхолаживания, а также прогрев в весенний период и формирование летнего термоклина (рис. 2, *a*).



**Рис. 2.** Внутригодовая изменчивость температуры (*a*) и солености (*b*) Мраморного моря, осредненных вдоль  $27,38^\circ$  в. д., по данным *CMEMS*<sup>4</sup> за 2007–2016 гг.

**Fig. 2.** Intra-annual variability of temperature (*a*) and salinity (*b*) in the Marmara Sea averaged along  $27.38^\circ$  E based on the *CMEMS* products<sup>4</sup> for 2007–2016

Поля солености по данным *CMEMS* демонстрируют типичную вертикальную халинную структуру вод в бассейне Мраморного моря, где соленость верхнего слоя определяется притоком и последующей трансформацией менее соленых черноморских водных масс. Глубже соленость значительно выше за счет поступления средиземноморских вод: перепад солености глубинных и поверхностных вод превышает 12 (рис. 2, *b*).

<sup>4</sup> Global Ocean 1/12° Physics Analysis And Forecast Updated Daily. 2018. URL: [http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_ANALYSIS\\_FORECAST\\_PHY\\_001\\_02](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_02) (date of access: 22.08.2018).

Кроме граничных условий результаты глобального анализа *CMEMS* были использованы также для задания начальных условий полей. Для инициализации модели в Черном и Азовском морях была использована процедура комбинации различных источников, изложенная в работе [9]. Температура и соленость для Азовского моря построены посредством оптимальной интерполяции наблюдений *in situ*. В качестве начальных для бассейна Черного моря использованы поля температуры и солености из реанализа гидрофизических параметров Центра морских прогнозов Черного моря [10]. Кроме того, чтобы получить начальные поля на 15 августа 2007 г., был проведен адаптационный расчет по методике, предложенной А. С. Саркисяном. Исходное разрешение подготовленных полей составляло  $1/24^\circ$ , поскольку первоначально они готовились для долгосрочных численных экспериментов с грубым разрешением. Далее массивы были проинтерполированы на сетку новой конфигурации и выполнен предварительный прогностический расчет общей циркуляции каскада за период 15 августа – 31 декабря 2007 г. для адаптации модели к высокому разрешению. Ранее в численных экспериментах было показано, что она происходит в течение около четырех месяцев [11].

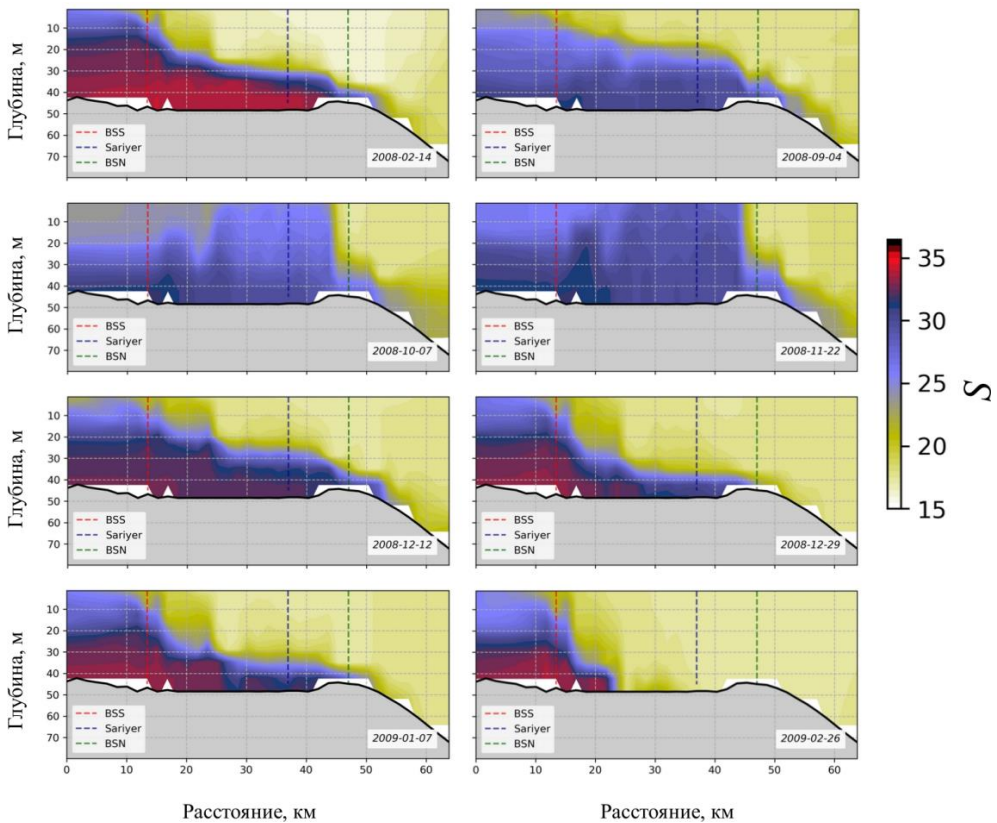
Основной численный эксперимент с использованием разработанной конфигурации был проведен за период 1 января 2008 г. – 31 декабря 2009 г. Результаты настоящей работы по времени соответствуют расчету из работы [2]. Это дает возможность провести их сопоставление, чтобы оценить качество моделирования пролива в его схематизированном представлении. Кроме того, период численного эксперимента частично совпал с временем проведения измерений из работы [6], которые также будут использованы для сопоставления. Положение станции *M7* из указанной работы отмечено на рис. 1, *b*.

### Анализ результатов

Несмотря на все неточности при воспроизведении конфигурации пролива (рис. 1, *b*), модель дает весьма правдоподобное распределение гидрологических характеристик вдоль оси пролива. В термохалинных полях отчетливо выделяются два слоя однородных водных масс, разделенных тонким слоем высоких градиентов. Это хорошо выражено на вертикальных разрезах солености вдоль пролива (рис. 3, фрагмент от 14.02.2008). Положение станций, вдоль которых построены разрезы, показано на рис. 1, *b*.

Отметим, что в расчете воспроизводится сезонный ход общего транспорта через Босфор (рис. 4, *a*), обусловленный главным образом интенсификацией речного стока в Черном море в мае – июне [12]. Соотношение расходов верхнего и нижнебосфорского течений соответствует диаграммам из работы [2] (рис. 4, *c*).

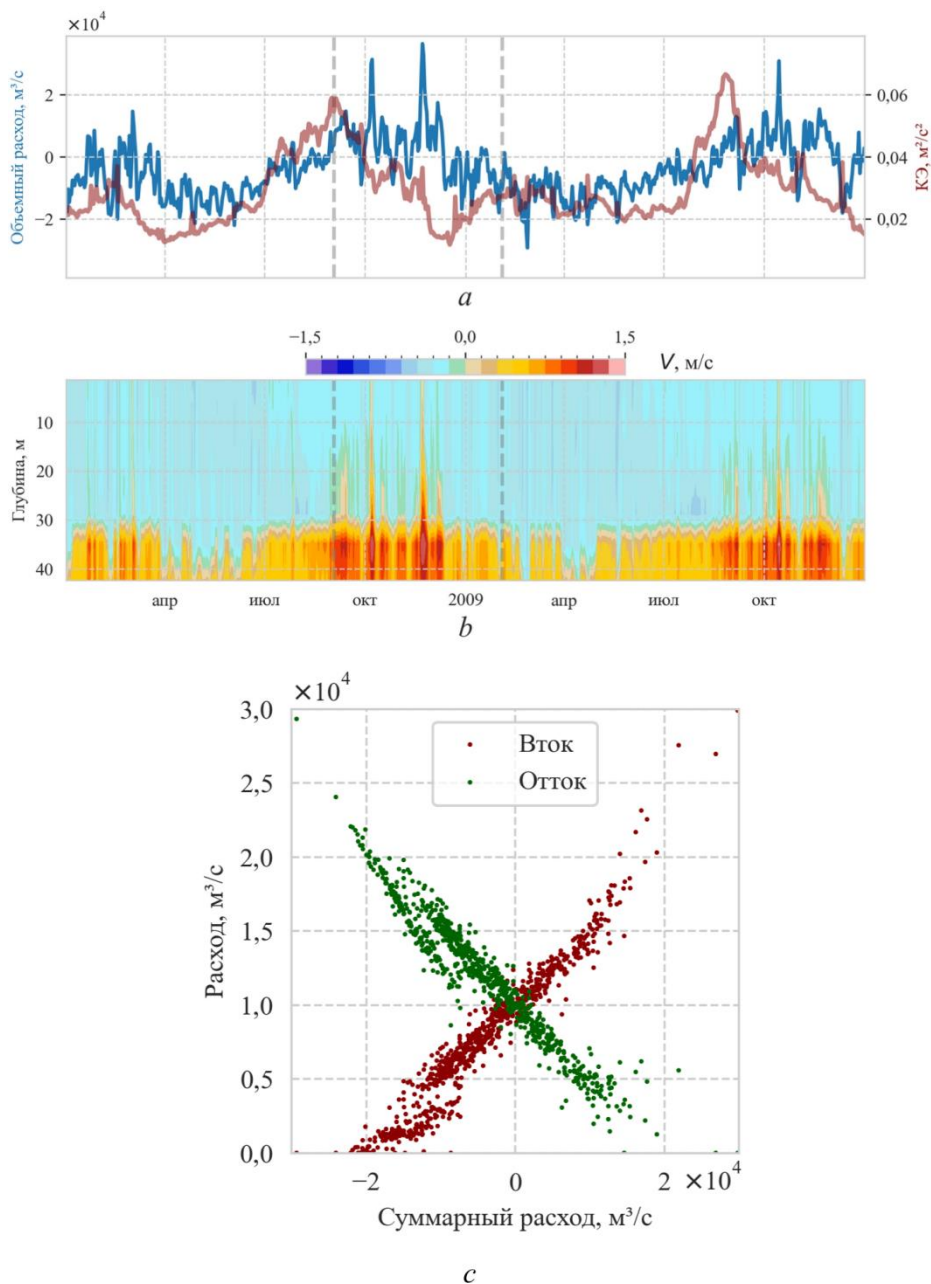
Течения в проливе также имеют двухслойную структуру (рис. 3 и 4, *b*). В верхнем слое течения направлены из Черного моря в Мраморное. Этот слой заполнен водами Черного моря, которые постепенно трансформируются по мере переноса вдоль пролива. Течение в нижнем слое направлено в сторону Черного моря. Здесь содержится вода Мраморного моря, также трансформирующаяся по мере движения. Изменения меридиональной скорости со временем демонстрируют, однако, наличие периодов блокировки верхнебосфорского или нижнебосфорского течения в проливе (рис. 4, *a, b*).



**Р и с. 3.** Распределение солёности морской воды вдоль пролива Босфор в отдельные даты 2008–2009 гг.

**F i g. 3.** Distribution of seawater salinity along the Bosphorus Strait on certain dates in 2008–2009

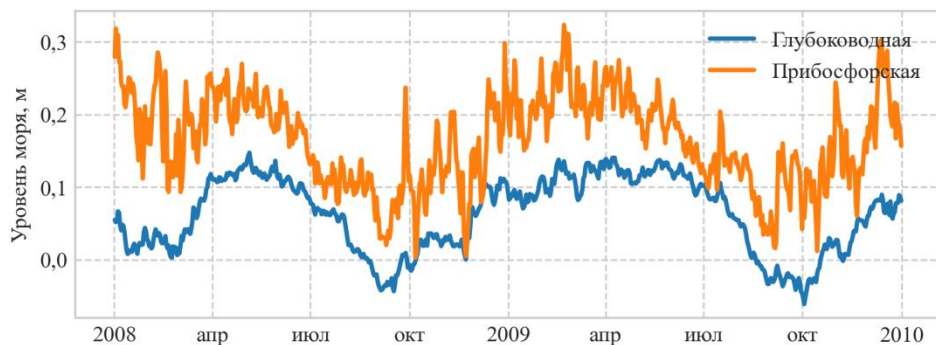




**Р и с. 4.** Динамика вод в проливе Босфор: *a* – средняя кинетическая энергия (КЭ) поверхностных течений в Мраморном море и суммарный баротропный меридиональный транспорт в окрестности точки *BSN*; *b* – меридиональные течения в северной части (*BSN*); *c* – значения втока и оттока как функции значений суммарного транспорта. Вертикальными штриховыми линиями показан период проведения наблюдений из работы [6]

**F i g. 4.** Water dynamics in the Bosphorus Strait: *a* – mean kinetic energy (CE) of surface currents in the Marmara Sea and total barotropic meridional transport in the vicinity of point *BSN*; *b* – meridional currents in the northern part (*BSN*); *c* – inflow and outflow values as the functions of total transport. Vertical dashed lines indicate the period of observations from [6]

Наши расчеты подтверждают также установленный в работе [2] механизм поддержания верхнебосфорского течения в зимний период. Он определяется подъемом уровня Черного моря в прибосфорском районе, обусловленным интенсификацией в это время Основного Черноморского течения (ОЧТ) (рис. 5).



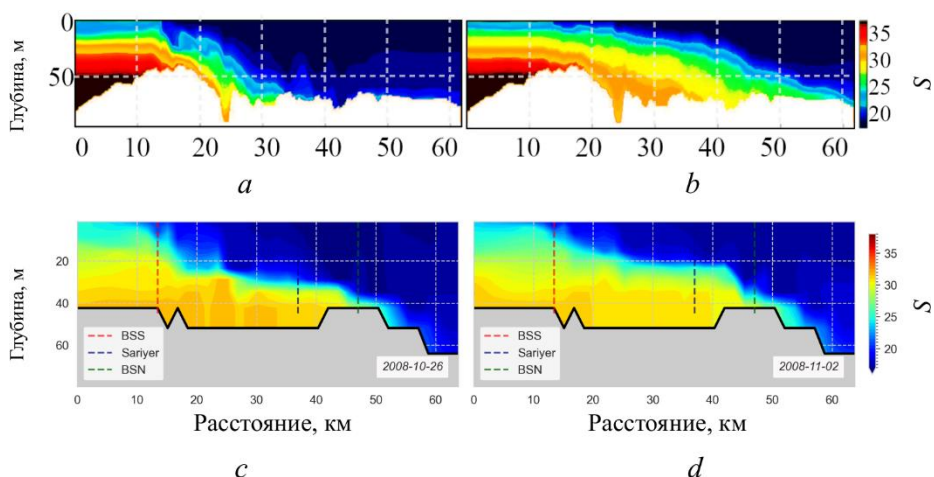
**Рис. 5.** Уровень Черного моря, осредненный по глубоководной (для глубин более 500 м) и прибосфорской акваториям

**Fig. 5.** The Black Sea surface level averaged over the deep-sea (deeper than 500 m) and near-Bosphorus areas

Сезонному ходу в нашем расчете подвержена также соленость нижнего слоя. В зимний период соленость может достигать 30–35 (рис. 3). При этом высокосоленая вода доходит по дну до порога на выходе из Босфора. Как правило, граница раздела слоев расширяется и поднимается к поверхности при подходе к Мраморному морю (рис. 3). В отдельные промежутки времени соленость у дна падает до 25–30 (рис. 3, фрагмент от 09.04.2008).

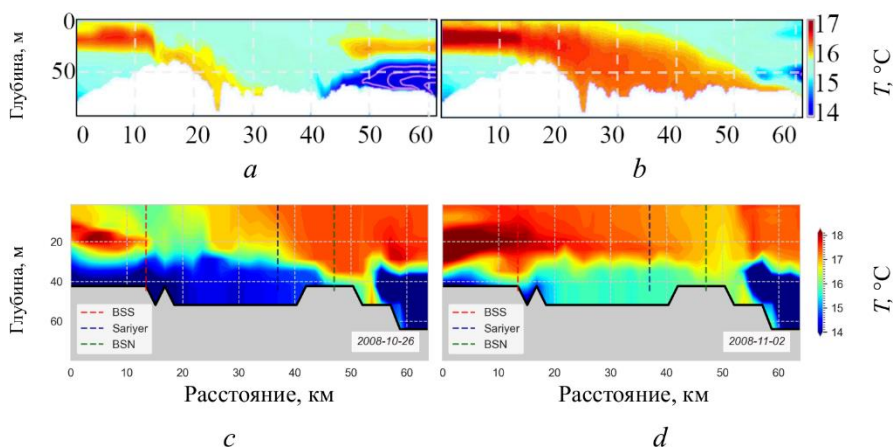
Как сезонная, так и высокочастотная изменчивость солености в нижнем слое пролива обусловлены особенностью вертикального строения солености в Мраморном море. В силу поступления более пресных черноморских вод в верхние слои бассейна и высокосоленых вод Эгейского моря в его нижние слои в Мраморном море формируется почти двухслойная стратификация. Колебания положения границы раздела между слоями в районе устья Босфора в Мраморном море определяют изменения солености в нижнем слое пролива.

Для сопоставления с результатами работы [2] рассмотрим разрезы солености вдоль пролива на 26 октября и 2 ноября 2008 г. (рис. 6). Для октября наш расчет показывает несколько более протяженное распространение вод Мраморного моря на север по сравнению с расчетом из работы [2]. Тем не менее в нашем расчете так же, как и в указанной работе, наблюдается блокирование черноморских вод на границе с Мраморным морем. В обоих расчетах видна тенденция подъема границы раздела в период с октября по ноябрь. Придонные воды в наших результатах оказались более холодными (рис. 7). В температуре хуже проявляется процесс вовлечения более соленых, но при этом более теплых мраморноморских вод в бассейн Черного моря.



**Р и с. 6.** Распределение солёности вдоль пролива 26 октября и 2 ноября 2008 г. по расчетам из работы [2] (*a, b*) и настоящей работы (*c, d*)

**F i g. 6.** Distribution of seawater salinity along the strait on 26.10.2008 and 02.11.2008 based on simulations in [2] (*a, b*) and in this paper (*c, d*)

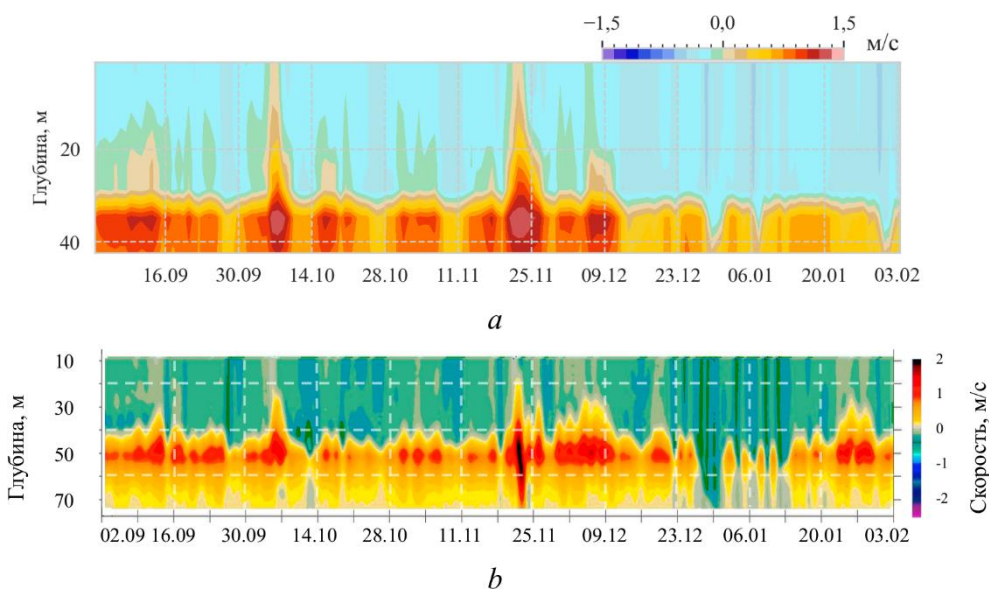


**Р и с. 7.** Распределение температуры (°C) вдоль пролива 26 октября и 2 ноября 2008 г. по расчетам из работы [2] (*a, b*) и настоящей работы (*c, d*)

**F i g. 7.** Distribution of seawater temperature (°C) along the strait on 26.10.2008 and 02.11.2008 based on simulations in [2] (*a, b*) and in this paper (*c, d*)

Граница раздела слоев значительно колеблется во времени. Иногда она поднимается к свободной поверхности и верхнебосфорское течение полностью блокируется (рис. 3, фрагмент от 26.02.2009). В работе [6] показано, что такие события связаны с воздействием ветра. В ней на основе непосредственных наблюдений скорости течений выделены периоды времени, когда верхнебосфорское течение полностью блокировалось. Их сопоставление с результатами настоящей работы (рис. 8) демонстрирует неплохое соответствие: в период проведения наблюдений согласуются события блокировки верхне-

и нижнебосфорского течений. При этом отметим, что положение границы раздела этих течений заметно отличается вследствие несоответствия модельной глубины реальной для данной станции.



**Р и с. 8.** Сравнение с данными наблюдений: меридиональные течения (м/с) в северной части пролива в период 9 сентября 2008 г. – 3 февраля 2009 г. по результатам моделирования (a) и измерениям из работы [6] (b)  
**Fig. 8.** Comparison with observational data: meridional currents (m/s) in the northern part of the strait in the period September 9, 2008 – February 3, 2009 based on the results of simulation (a) and measurements from [6] (b)

Примерно 7 октября и 22 ноября 2008 г. блокировка верхнебосфорского течения наблюдалась как на южной, так и на северной оконечности пролива, где были выставлены буи с измерителями течений [6]. В анализируемых результатах в эти дни воды Мраморного моря занимают пролив Босфор по всей его глубине – от южного устья и почти до северной оконечности (рис. 3, фрагменты от 7 октября и 22 ноября 2008 г.). Кроме того, из наблюдений, приведенных в [6], следует, что с сентября 2008 г. по февраль 2009 г. наблюдалось еще три случая блокировки верхнебосфорского течения у южной оконечности пролива. В то же время на севере пролива в эти дни, как обычно, в верхнем слое наблюдался перенос черноморских вод в направлении Мраморного моря. Согласно нашему расчету, в эти дни в районе южной оконечности пролива также наблюдается либо исчезновение верхнего слоя, либо существенное уменьшение его толщины.

Наблюдения, приведенные в [6], показали также, что в районе северной оконечности пролива с конца декабря 2008 г. по середину января 2009 г. наблюдалось несколько случаев блокировки нижнебосфорского течения. Согласно работе [6], полная блокировка переноса в направлении Черного моря наблюдалась в конце декабря (рис. 8). Разрезы солености вдоль пролива

(рис. 3) показывают, что в это время нижнебосфорское течение полностью блокируется на его северной оконечности.

Примерно между 5 и 14 января 2009 г. нижнебосфорское течение на севере пролива, согласно работе [6], блокируется почти до дна (рис. 8). В нашем расчете в эти дни нижний слой не исчезает полностью, но его толщина существенно уменьшается. Вместе с тем в расчетах наблюдается и полная блокировка нижнебосфорского течения почти по всей длине пролива (рис. 3, фрагмент от 26.02.2009).

В целом анализ меридиональных течений в проливе за два года демонстрирует, что блокировки верхнебосфорского течения происходят начиная с сентября (рис. 4, *b*), что, по-видимому, вызвано интенсификацией течений в Мраморном море к этому времени (рис. 4, *a*), обусловленной ветровым воздействием. При этом далее, как видно из рис. 5, происходит ослабление ОЧТ. При ослаблении мраморноморской циркуляции можно наблюдать явления блокировки нижнебосфорского течения.

### Обсуждение

Анализ меридиональных течений в проливе демонстрирует, что блокировки верхнебосфорского течения происходят начиная с сентября, что может быть вызвано интенсификацией обусловленных ветровым воздействием течений в Мраморном море и последующим ослаблением ОЧТ. Это приводит к поступлению соленых мраморноморских вод в бассейн Черного моря и формированию в нем линз соленой воды, воспроизведенных в представленном численном эксперименте [5]. Это также может быть объяснением интрузий соленой воды, выявленных в этот период по измерениям буев-профилемеров [1]. При ослаблении мраморноморской циркуляции в зимне-весенний период можно наблюдать обратные явления, при которых возникают события блокировки нижнебосфорского течения.

### Выводы

Приведенное в настоящей работе сопоставление гидрофизических полей в проливе Босфор с наблюдениями показывает, что предложенная модель весьма неплохо воспроизводит ситуации блокировки верхнебосфорского или нижнебосфорского течения по сравнению с конечно-элементными моделями, позволяющими учитывать более сложную конфигурацию пролива. При этом соотношения расходов верхне- и нижнебосфорского течений, полученные на основе конечно-элементных моделей и по результатам нашего численного эксперимента, количественно согласуются. Подтвержден механизм поддержания верхнебосфорского течения в зимний период. Он определяется подъемом уровня Черного моря в прибосфорском районе, обусловленным интенсификацией ОЧТ.

Основываясь на результатах такой калибровки предлагаемой региональной конфигурации модели *NEMO<sub>2</sub>*, можно полагать, что она качественно верно описывает реакцию пролива на изменения как ветрового воздействия, так и плотности морской воды в окрестности северного и южного входов в пролив.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Observed basin-wide propagation of Mediterranean water in the Black Sea / A. Falina [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122, iss. 4. P. 3141–3151. <https://doi.org/10.1002/2017JC012729>
2. *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. P. 1003–1025. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1071-2>
3. *Демьшев С. Г., Довгая С. В.* Численное моделирование циркуляции Мраморного моря в 2008 году с учетом ветра и водообмена через проливы Босфор и Дарданеллы // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 1. С. 68–78. EDN RGDFTA.
4. NEMO ocean engine / G. Madec [et al.]. France : IPSL, 2015. 391 p. (Notes du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace ; No. 27). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3248739>
5. *Мизюк А. И., Коротаев Г. К.* Черноморские внутритропикноклинные линзы по результатам численного моделирования циркуляции бассейна // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56, № 1. С. 112–122. EDN MHXSSO. <https://doi.org/10.31857/S0002351520010101>
6. On flow variability in the Bosphorus Strait / E. Jarosz [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, iss. C8. C08038. <https://doi.org/10.1029/2010JC006861>
7. *Leclair M., 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>
8. *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>
9. 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. EDN XHZZAR. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-496-510>
10. Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря / Г. К. Коротаев [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 5. С. 609–617. EDN WORWIV. <https://doi.org/10.7868/S0002351516050072>
11. Особенности горизонтальной изменчивости температуры поверхности в западной части Черного моря по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением / А. И. Мизюк [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 5. С. 639–648. EDN WORWNB. <https://doi.org/10.7868/S0002351516050102>
12. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IV. Черное море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. СПб. : Гидрометеоздат, 1991. 428 с.

*Об авторах:*

**Мизюк Артем Игоревич**, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 8285-8260**, **ORCID ID: 0000-0003-4885-354X**, **ResearcherID: C-6125-2016**, [artem.mizyuk@mhi-ras.ru](mailto:artem.mizyuk@mhi-ras.ru)

**Коротаев Геннадий Константинович**, научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, **SPIN-код: 9861-2241**, **ResearcherID: K-3408-2017**, **Scopus Author ID: 7004998153**, [gkorotaev@gmail.com](mailto:gkorotaev@gmail.com)