

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА


Научная статья

УДК 551.465.4
EDN: GPIRAN

DOI: 10.29039/0233-7584-2023-2-139-156

Особенности водообмена через Керченский пролив по результатам численного моделирования циркуляции с высоким пространственным разрешением

А. И. Мизюк , О. С. Пузина, Г. К. Коротаев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 11.04.2022; одобрена после рецензирования 28.11.2022;
принята к публикации 16.01.2023.

Аннотация

Цель. Цель работы – исследование синоптической изменчивости гидрофизических параметров в бассейнах Азовского и Черного морей, вызванной поступлением через пролив водных масс, отличающихся по своим свойствам от окружающих в отмеченных бассейнах.

Методы и результаты. Выполнен анализ результатов численного моделирования циркуляции каскада морей (Азовское – Черное – Мраморное) для 2008–2009 гг. Использовались региональная конфигурация комплекса численного моделирования *NEMO* и результаты атмосферного реанализа *ERA5*. Основные результаты получены для конфигурации с пространственным разрешением расчетной сетки приблизительно 1,1 км. Демонстрируются процессы затока азовских вод в Черное море, а черноморских водных масс в бассейн Азовского и их последующая эволюция. Приведены оценки водо- и солеобмена через Керченский пролив.

Выводы. Регулярная смена направления переноса вод через пролив, обусловленная значительной изменчивостью ветра, составляет основной механизм изменений водообмена между бассейнами. Анализ изменений однонаправленных потоков соли через Керченский пролив, превышающих среднегодовые значения, позволил выявить события значительного поступления соли в Азовское море. Доля таких событий составляет от 20–25 до почти 70 % от общего числа заток.

Ключевые слова: численное моделирование, Керченский пролив, Азовское море, солеобмен, перемежаемость, водообмен, циркуляция вод, синоптическая изменчивость, транспорт воды

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0007.

Для цитирования: Мизюк А. И., Пузина О. С., Коротаев Г. К. Особенности водообмена через Керченский пролив по результатам численного моделирования циркуляции с высоким пространственным разрешением // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 139–156. EDN GPIRAN. doi:10.29039/0233-7584-2023-2-139-156

Features of Water Exchange through the Kerch Strait Based on the Results of Numerical Modeling of the Circulation with High Spatial Resolution

A. I. Mizyuk ✉, O. S. Puzina, G. K. Korotaev

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The work is purposed at studying the synoptic variability of hydrophysical parameters in the basins of the Azov and Black seas induced by the water masses inflow through the strait; at that the inflowing water features differ from the analogous ones in the above-noted basins.

Methods and Results. The results of numerical modeling of circulation in the cascade of seas (the Azov – Black – Marmara seas) for 2008–2009 were analyzed. Regional configuration of the *NEMO* numerical modeling platform and the results of the *ERA5* atmospheric reanalysis were used. The main results were obtained for the configuration with the ~ 1.1 km spatial resolution of the computational grid. The processes of the Azov Sea waters inflow to the Black Sea and their further evolution, as well as the analogous processes with the Black Sea waters in the Azov Sea basin are demonstrated. The estimates of water and salt exchange through the Kerch Strait are represented.

Conclusions. Regular change of the water transfer direction through the strait conditioned by the wind significant variability constitutes the basic mechanism for the changes in water exchange between the basins. Having being analyzed, the changes in the unidirectional salt flows through the Kerch Strait exceeding average annual values, permitted to identify the events of significant salt inflow to the Sea of Azov. The portion of such events ranges from 20–25 to almost 70 % of the total number of inflows.

Keywords: numerical modeling, Kerch Strait, Sea of Azov, salt exchange, intermittency, water exchange, water circulation, synoptic variability, water transport

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the state assignment on theme No. 0555-2021-0007.

For citation: Mizyuk, A.I., Puzina, O.S. and Korotaev, G.K., 2023. Features of Water Exchange through the Kerch Strait Based on the Results of Numerical Modeling of the Circulation with High Spatial Resolution. *Physical Oceanography*, 30(2), pp. 125-140. doi:10.29039/0233-7584-2023-2-125-140

Введение

Исследования водообмена Азовского и Черного морей ведутся уже почти 150 лет. Это в первую очередь связано с активным использованием Керченского пролива как транспортной магистрали. Вторая, но не менее важная причина заключается в том, что транспорт вод через пролив в значительной степени определяет состояние экологии и гидрологии Азовского моря – важного рыбного промыслового района с береговой линией, достаточно привлекательной для развития курортного бизнеса.

Как отмечалось в [1], уже в первых работах были представлены основные факторы, определяющие характер водообмена через Керченский пролив. Например, постулируется, что течения в Керченском проливе вызываются перепадом уровня и разностью плотности воды на границах пролива. Было также отмечено, что течения в проливе определяются скоростью ветра и изменениями атмосферного давления.

Интенсивные наблюдения, организованные в 50-е годы прошлого века, так же, как и предшествующие, более ограниченные натурные данные, в целом подтвердили справедливость первоначальных выводов [1]. Впоследствии на основе полученных инструментальных данных были построены различные полуэмпирические соотношения, определяющие зависимость водообмена от разности уровней на концах пролива, и проекции скорости ветра на его продольную ось [1, 2]. Вместе с тем стало ясно, что сложная конфигурация берегов пролива и рельефа его дна обуславливает перераспределение течений, в результате чего затруднительно получить полное представление об изменчивости потоков на основе ограниченного количества данных контактных наблюдений.

Водообмен через Керченский пролив двояко влияет на гидрологические характеристики Черного и Азовского морей. Прежде всего, он совместно с речным стоком, осадками и испарением дает вклад в водный и солевой баланс бассейнов. Характерный масштаб времени этого процесса определяется отношением объема вод каждого из бассейнов к величине расхода через проливы и составляет несколько сотен лет для Черного моря. Для более мелководного Азовского моря характерное время оказывается существенно меньшим.

Контрасты в температуре поверхности моря (ТПМ) и характеристиках цветности воды, наблюдаемые с искусственных спутников Земли сканерами с высоким пространственным разрешением, позволяют получить представление о пространственной структуре переноса вод через пролив [3, 4]. Спутниковые наблюдения свидетельствуют, что поступающие через проливы воды дают вклад в синоптическую изменчивость гидрофизических полей Азово-Черноморского бассейна. Синоптические структуры, выделяющиеся на спутниковых изображениях, проявляются при затоках через пролив объемов жидкости, отличающейся по своим свойствам от окружающих вод Азовского или Черного морей. Однако данный вид наблюдений не дает представления о вертикальной структуре течений и, таким образом, позволяет лишь косвенно оценивать величину объемного переноса распресненных вод Азовского моря и соленых черноморских вод [4]. При этом динамика синоптических структур по спутниковым наблюдениям может быть прослежена только до тех пор, пока сохраняются контрасты в поле ТПМ или цвета моря.

В последние два десятка лет детальное исследование водообмена в Керченском проливе выполняется также на основе численных моделей циркуляции. В работах [5–7] представлены расчеты, в которых установлена циркуляция вод в проливе и прилегающих акваториях в зависимости от силы и направления ветра, действующего достаточно длительное время. Современные вычислительные ресурсы дают возможность рассчитать водообмен через пролив с учетом изменений, происходящих как в Азовском, так и в Черном море под влиянием меняющегося атмосферного воздействия на морскую среду и речного стока [8]. Требования к численной модели могут быть различны в зависимости от временного масштаба исследуемых процессов. При моделировании климатических изменений стратификации Черного моря для достижения аккуратного количественного описания необходимо воспроизводить структуру водообмена через пролив как можно более детальной, так как небольшие систематические неточности в воспроизведении потоков соли

через проливы при длительном интегрировании накапливаются с течением времени и искажают тренды эволюции полей бассейна.

Детальное описание течений в Керченском проливе требует значительного уменьшения шага расчетной сетки [8, 9]. Особенностью работы [9] является использование численной модели циркуляции, реализованной на неструктурированной сетке. Такой подход позволил вводить повышенное локальное разрешение и учитывать более детализированную береговую черту и топографию дна не только в Керченском проливе, но и в проливах Босфор и Дарданеллы.

В то же время для исследования вклада водообмена через пролив в формирование синоптической и сезонной изменчивости полей Азовского и Черного морей, как представляется, возможно использовать более грубое описание пролива, нежели это сделано в работе [9]. Цель настоящей работы – на основе результатов численного моделирования исследовать синоптическую изменчивость полей Азовского и Черного морей, вызванную поступлением через пролив водных масс, отличающихся по своим свойствам от окружающих в отмеченных бассейнах.

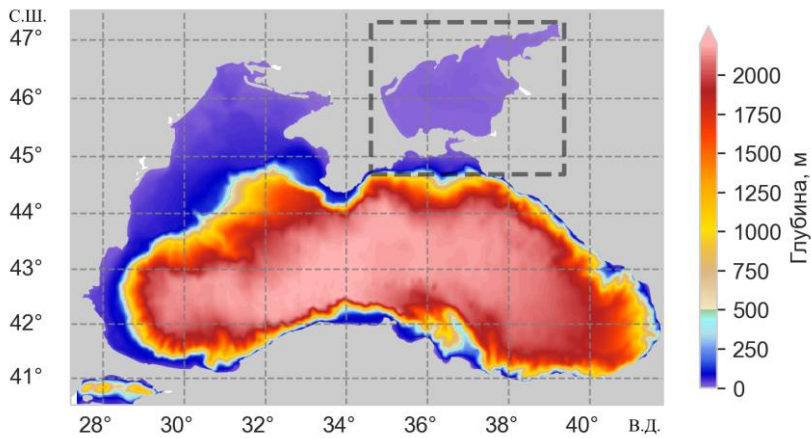
Материалы и методы

Для анализа мы используем результаты численного моделирования циркуляции каскада морей (Азовское – Черное – Мраморное), выполненного посредством комплекса междисциплинарного моделирования компонентов океанских (морских) систем *NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean)* [10]. Гидродинамический блок комплекса основан на системе уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости, подробно описанной в работе [10]. Конечно-разностные аналоги уравнений реализованы для произвольной криволинейной сетки C по терминологии Аракавы [11]. Дискретизация по времени осуществляется посредством модифицированной схемы «чехарда» [12].

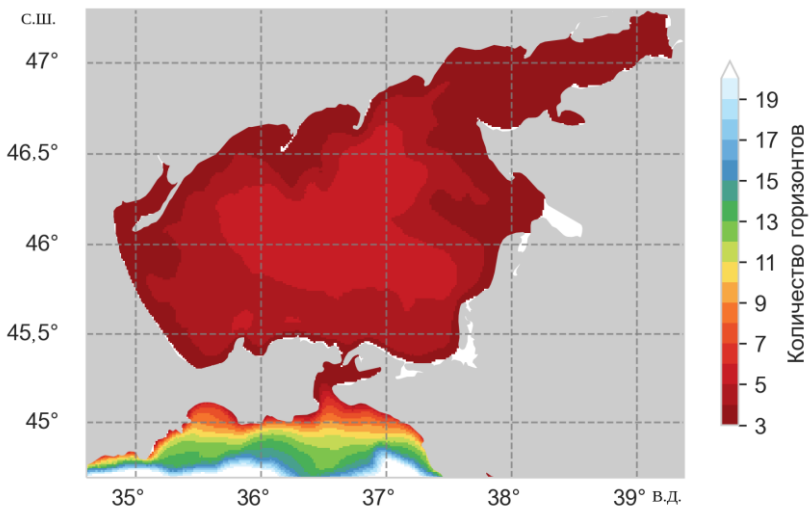
В настоящей работе используются результаты из работ [13, 14], в которых предложены региональные конфигурации *NEMO BAMS (Black, Azov and Marmora Seas)*, позволяющие проводить численное моделирование циркуляции морей каскада с различными пространственными разрешениями. Здесь отметим лишь некоторые особенности. Для расчета уровня моря в модели используется численное решение уравнения для кинематического условия на поверхности с использованием схемы расщепления по времени на быструю (баротропную) и медленную (бароклинную) моды [15]. Расчетный домен конфигурации с высоким пространственным разрешением представляет собой квазирегулярную сетку, покрывающую моря каскада [14] с шагами по широте и долготе $1/96^\circ$ и $1/69^\circ$ (*BAMS96*). Это 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 расчетного домена построена на основе цифрового массива батиметрии из проекта *EMODNet*¹ (рис. 1). Боковой обмен в уравнениях движения и переноса – диффузии тепла/соли описывается бигармоническим оператором с коэф-

¹ URL: <http://www.emodnet-bathymetry.eu> (дата обращения: 22.03.2023).

фициентами вязкости и диффузии, по модулю равными $4 \cdot 10^7 \text{ м}^4/\text{с}$ и $8 \cdot 10^6 \text{ м}^4/\text{с}$ соответственно. Для удовлетворения критерию Куранта – Фридрихса – Леви шаг по времени для бароклинной моды равняется 60 с, для баротропной моды – 4 с. Дискретизация по вертикали выполнена с использованием z -координаты с дробным шагом на 35 горизонтах. Значения глубин горизонтов задаются посредством аналитической функции [10] таким образом, чтобы на Азовское море приходилось пять горизонтов (рис. 1, *b*).



a



b

Р и с. 1. Конфигурация *NEMO BAMS96*: топография дна, построенная на основе батиметрических данных [15] (*a*) и количество расчетных горизонтов в акватории Азовского моря и Керченского пролива (*b*)

F i g. 1. *NEMO BAMS96* configuration: bottom topography constructed on the basis of bathymetry data [15] (*a*) and a number of computational horizons in the Azov Sea and Kerch Strait water areas (*b*)

Постановка граничных условий на поверхности выполнена на основе полей температуры и влажности воздуха на высоте 2 м, компонент горизонтальной скорости ветра на высоте 10 м, радиационных 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*². Пространственное разрешение полей продукта составляет 0,25°, а дискретизация по времени – 1 ч, что может быть весьма важно для воспроизведения короткопериодных (внутрисуточных) процессов и суточного хода. Отмеченные метеопараметры с исходной дискретностью по времени использовались для расчета суммарных потоков тепла, массы (осадки минус испарение) и напряжения трения ветра посредством балк-формулы протокола *CORE* (*Coordinated Ocean-ice Reference Experiments*)³. Общее представление о поле ветра по данным реанализа *ERA5* дает рис. 2. Как видно, в 2008–2009 гг. над акваторией Азовского моря в большую часть года преобладает циклоническая завихренность (рис. 2). Она меняет знак ближе к концу года во второй половине осени. Над Черным морем завихренность меняет знак в летние месяцы. Наиболее повторяющимися направлениями ветра над акваторией Азовского моря являются северо-восточное и востоко-северо-восточное (рис. 2, *b*).

Отметим, что в проведенном эксперименте не учитывался ледовый покров, который регулярно формируется в акватории Азовского моря в зимний период [16]. Формирование льда в бассейне Азовского моря не учитывалось. Вместо этого при проведении расчетов выполнялась коррекция потока тепла в области, где расчетная ТПМ становится ниже температуры замерзания воды, но без коррекции коэффициента динамического сопротивления, важного для определения напряжения трения ветра. Отчасти это может повлиять на результаты анализа динамики вод моря в зимний период. С другой стороны, проведенный в работе [16] анализ показал, что зимы периода 2008–2009 гг. соответствуют теплым и умеренным ледовым условиям, т. е. льдом покрывался не весь бассейн, а только отдельные его части, и сам пролив также был свободен ото льда.

Для инициализации модели в бассейне Черного моря подготовлены начальные поля на основе результатов реконструкции температуры и солености в системе Центра морских прогнозов ФГБУН ФИЦ МГИ⁴. Для акватории Азовского моря начальные условия получены на основе объективного анализа измерений *in situ*, предоставляемых в базах океанографических данных Центра мониторинга за состоянием морской среды проекта Коперник (*CMEMS*) и проекта *SeaDataNet* (URL: <https://www.seadatanet.org/>). Более подробные описания подготовки начальных условий и постановка условий на открытой жидкой границе в Мраморном море приведены в работе [13].

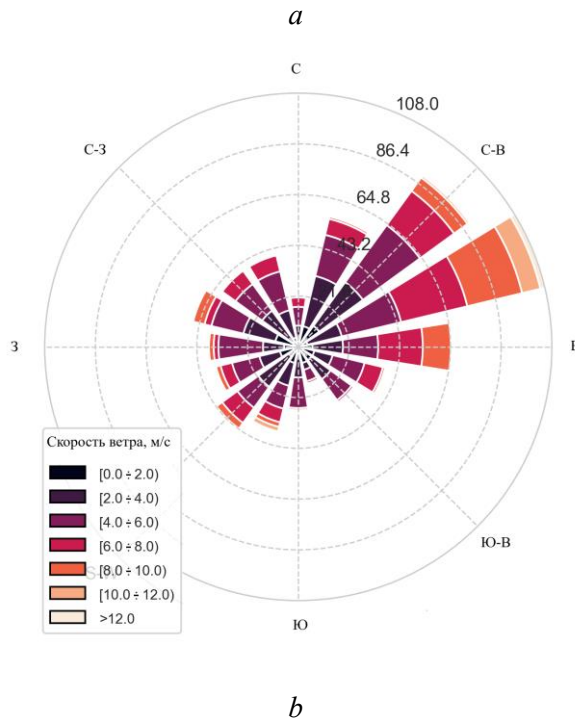
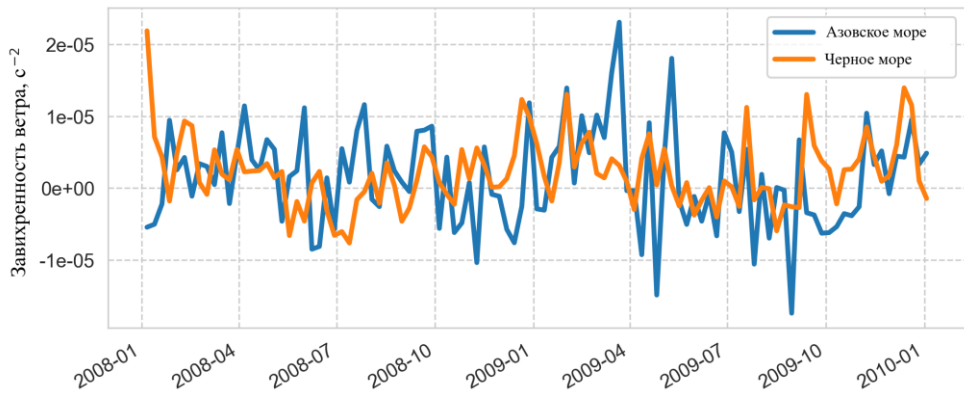
Численный эксперимент на основе конфигурации с высоким пространственным разрешением (ВР) стартовал летом 2007 г., но представленный анализ выполнен для 2008–2009 гг. Дополнительно мы проводили также сопоставле-

² URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/> (дата обращения: 22.08.2018).

³ Large W. G., Yeager S. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: The data sets and flux climatologies. Boulder, Colorado, USA : NCAR, 2004. (NCAR Technical Note ; NCAR/TN-460+STR), <http://dx.doi.org/10.5065/D6KK98Q6>

⁴ URL: <http://mis.bsmfc.net:8080/thredds/catalog.html> (дата обращения: 28.03.2022).

ние результатов численного моделирования с использованием аналогичной конфигурации со средним пространственным разрешением (шаг 4,6 км) (СР) из работы [13].



Р и с. 2. Средняя по акватории моря завихренность поля скорости ветра (с^{-2}) (*a*) и повторяемость ветра в бассейне Азовского моря за 2008–2009 гг. (*b*)
F i g. 2. Sea area averaged vorticity of the wind speed field (с^{-2}) (*a*) and the wind frequency in the Azov Sea basin in 2008–2009 (*b*)

Водообмен Черного и Азовского морей осуществляется через мелкий (глубиной не более 18 м) и довольно широкий (шириной от 4 до 42 км в разных

его частях) Керченский пролив. Поэтому размер шага сетки 1,2 км при расчетах позволяет использовать достаточно подробную береговую линию.

Для воспроизведения процесса осолонения вод Азовского моря в настоящей работе, как и в работе [13], были использованы данные наблюдений объемного стока рек Дон и Кубань из базы данных ². Отметим, что его величина заметно снижается с 2006 г. Это позволило в долгопериодных прогностических расчетах получить весьма адекватное соответствие между результатами моделирования и данными наблюдений [13].

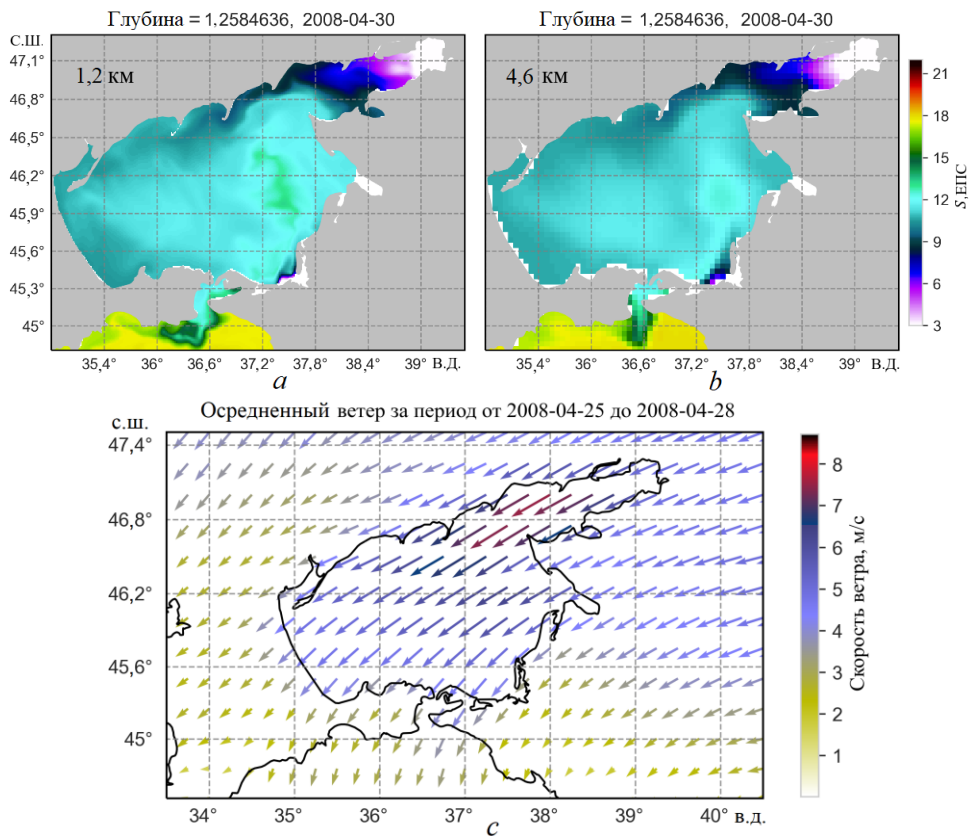
Результаты и обсуждение

Рассмотрим пространственную изменчивость течений в проливе, полученную на основе результатов численного моделирования. На основе анализа доступных наблюдений ранее предполагалось [1], что в Керченском проливе одновременно существует два разнонаправленных потока. Поступление вод из Азовского моря в Черное при этом происходит вдоль побережья Крыма. Обратный перенос осуществляется вдоль Таманского полуострова. Однако ввиду мелководности пролива на движения вод существенное влияние оказывает вызванный ветром дрейфовый и градиентный перенос. Характер водообмена через пролив в итоге существенно изменяется в зависимости от типа ветрового поля. В дальнейшем анализе основное внимание будет уделено рассмотрению интенсивных затоков вод, подобных тем, что наблюдаются на спутниковых изображениях [3, 4].

При действии интенсивных северо-восточных ветров по всей ширине пролива наблюдается перенос вод из Азовского моря. Поступление вод в Черное море имеет вид струи, меняющей направление распространения с южного на восточное (рис. 3). Поступающая из пролива в Черное море вода, как правило, далее движется на запад вдоль крымского побережья, не пересекая струю Основного Черноморского течения. Расстояние от пролива, на котором еще прослеживается азовоморская вода, зависит от продолжительности действия ветра нужного направления. В отдельных случаях трансформированная водная масса, двигаясь из Азовского моря, прослеживается в температуре поверхности или цвете моря вплоть до центральной части [3, 4]. Впервые проявление данного процесса, по-видимому, было идентифицировано на основе наблюдений прозрачности вод на океанографической платформе в пос. Кацивели [17].

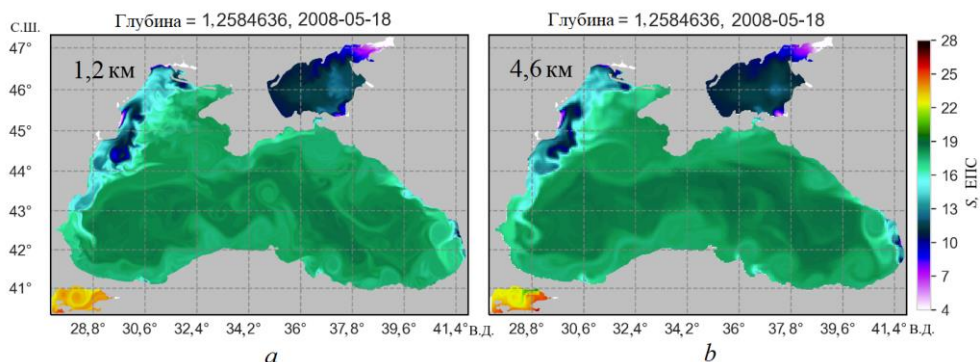
В численном эксперименте ВР удалось воспроизвести процесс распространения вод Азовского моря на большое расстояние вдоль берега Крыма (рис. 4). В районе мыса Ай-Тодор прибрежная струя развернулась в открытое море. Далее распресненные воды еще можно проследить в виде струи на некотором расстоянии от берега, но затем они смешиваются с окружающими водами Черного моря.

Использование более грубого пространственного разрешения (эксперимент СР) приводит к заметному сглаживанию контрастов в полях солености, а также менее выраженному процессу формирования струи у побережья Крыма. В результате этого в полях солености из отмеченного эксперимента она почти не проявляется уже к середине мая 2008 г. (рис. 4).



Р и с. 3. Заток азовоморских вод в Черное море в конце апреля 2008 г.: распределение поверхностной солености по результатам эксперимента ВР (а) и СР (b), средняя ветровая циркуляция (с), предшествовавшая событию

F i g. 3. The Azov Sea waters inflow to the Black Sea in late April, 2008: distribution of surface salinity based on the results of the HR (a) and AR (b) experiments, average wind circulation (c) preceding the event

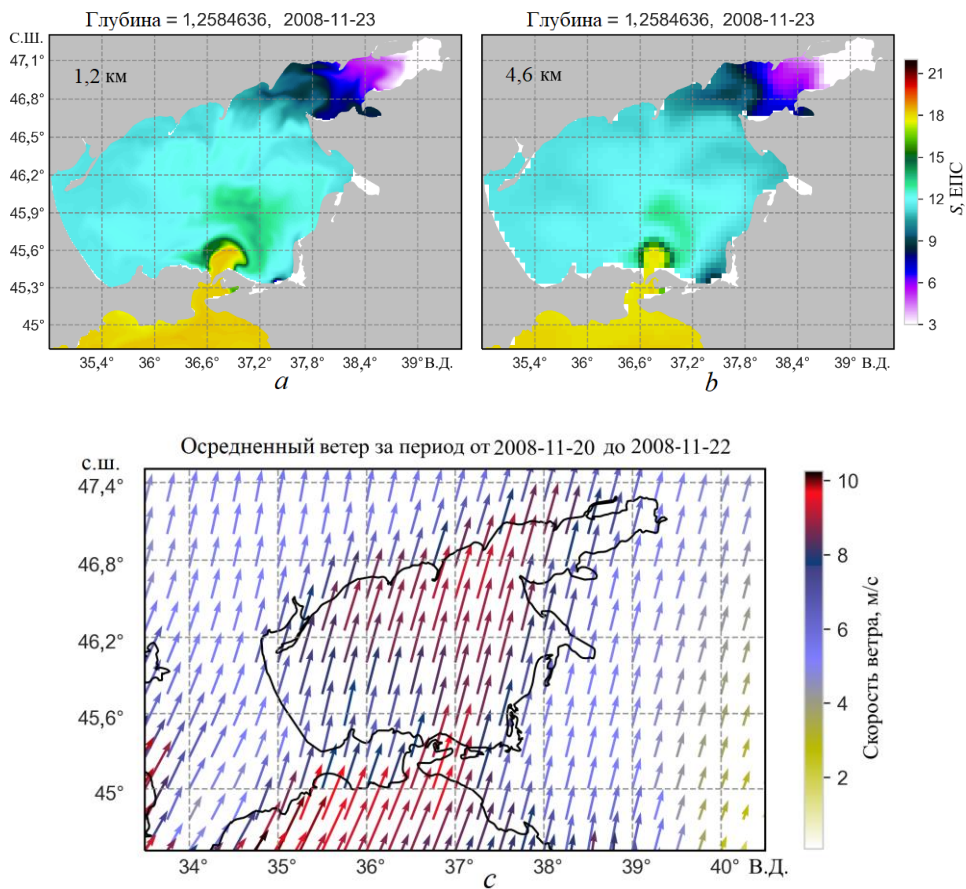


Р и с. 4. Распространение струи азовоморских вод вдоль побережья Крыма и ее смешение в открытом море: распределение поверхностной солености 18 мая 2008 г. по результатам экспериментов ВР (а) и СР (b)

F i g. 4. Propagation of the Azov Sea water flow along the coast of Crimea and its mixing in the open sea: distribution of surface salinity on May 18, 2008 based on the results of the HR (a) and AR (b) experiments

При интенсивных ветрах противоположного направления черноморская вода широким потоком, занимающим весь пролив, вторгается в Азовское море (рис. 5). Можно видеть, что перепад солёности на фронте вторгающейся воды достигает 3 ЕПС. Проникшая в Азовское море солёная вода частично трансформируется за счёт смешения с окружающими водами. Тем не менее в течение четырех месяцев на значительной части акватории Азовского моря выделяется пятно осолоненных вод, вытянувшееся более чем на 100 км (рис. 5).

Длительное существование зон с повышенной (для случая Азовского моря) или пониженной (для Черного моря) солёностью после событий затоков через пролив наиболее отчетливо проявляется в результатах эксперимента ВР.

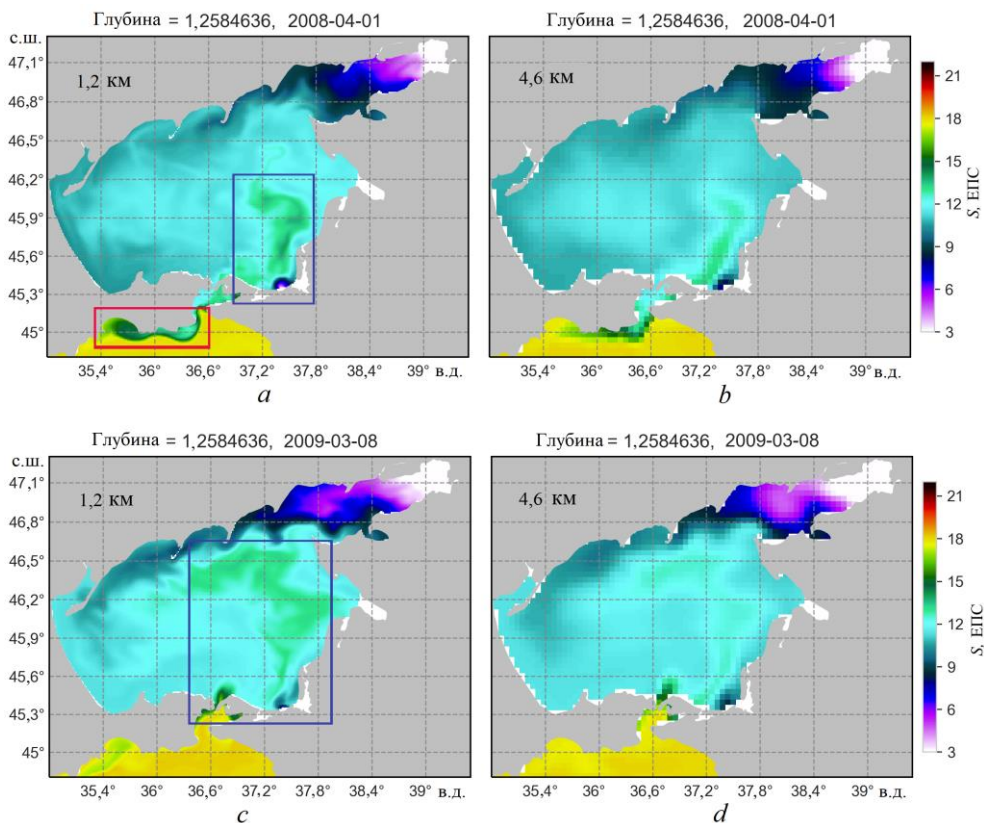


Р и с. 5. Интенсивный заток соленых вод в Азовское море в ноябре 2008 г.: распределение поверхностной солёности в эксперименте ВР (a) и СР (b); средняя ветровая циркуляция (c), предшествовавшая событию

Fig. 5. Intensive saline water inflow to the Sea of Azov in November, 2008: surface salinity distribution in the HR (a) and AR (b) experiments; average wind circulation (c) preceding the event

Выполненные расчеты показывают, что обусловленная значительной изменчивостью ветров регулярная смена направления переноса вод через Керченский пролив является основным механизмом перемежаемости водообмена

между Черным и Азовским морями. Результат влияния перемежаемости водообмена на гидрофизические поля представлены на рис. 5. Как видно, в Азовском море вследствие последовательных «инъекций» черноморских вод через Керченский пролив формируется пятно более соленых вод (рис. 6). В то же время можно видеть движение струи распресненных азовоморских вод вдоль побережья Крыма после смены направления ветра (красный прямоугольник на рис. 6, *a*) и последующее формирование нового залива соленых вод у Таманского полуострова.



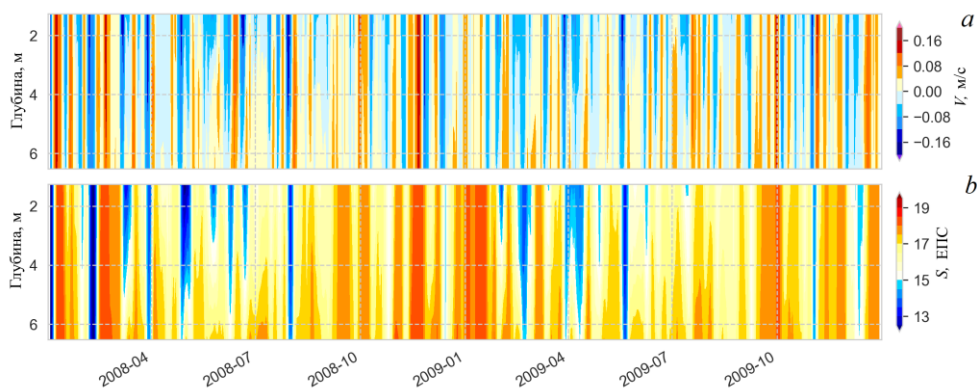
Р и с. 6. Распространение черноморских вод в бассейне Азовского моря в 2008 г. (*a, b*) и в 2009 г. (*c, d*) в полях поверхностной солености в эксперименте ВР (*a, c*) и СР (*b, d*). Красным прямоугольником обозначена область распространения азовоморских вод в бассейне Черного моря, синим – формирование залива соленых вод

F i g. 6. Propagation of the Black Sea waters in the Azov Sea basin in 2008 (*a, b*) and 2009 (*c, d*) in the fields of surface salinity in the HR (*a, c*) and AR (*b, d*) experiments. Red rectangle indicates the area of distribution of the Azov Sea waters in the Black Sea basin, blue one – formation of the salt water inflow

Последовательные заливы черноморских вод в Азовское море приводят к формированию пятна соленых вод в бассейне, которое хорошо выражено и длительное время прослеживается в результатах эксперимента ВР (синий прямоугольник на рис. 6, *a, c*). Как видно, перенос соленых вод течениями происходит в циклоническом направлении. Сравнение результатов моделиро-

вания двух численных экспериментов позволяет отметить, что более соленые черноморские воды в эксперименте СР проявляются в полях не так ярко и намного быстрее смешиваются с окружающими водами.

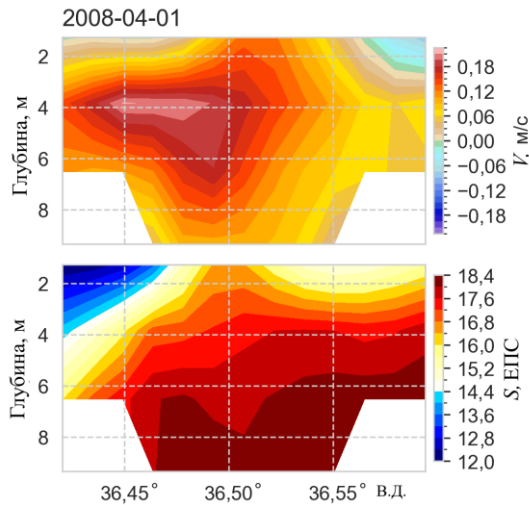
Определяемую сменой ветрового режима перемежаемость водообмена Азовского и Черного морей наглядно демонстрируют диаграммы глубина – время для гидрофизических параметров в районе Керченского пролива (рис. 7, *a*). При устойчивых ветрах скорости течений в проливе достаточно высоки и могут достигать по модулю более 0,3 м/с. В периоды наибольшей интенсификации водообмена профиль скорости весьма слабо меняется по глубине и по сечению пролива. В то же время в периоды ослабления ветров направление интегрального переноса меняет знак с глубиной, то есть в проливе формируется выраженная двухслойная структура переноса по глубине (рис. 7, *b*). Число событий интенсивного затока соленых черноморских вод (положительные скорости) увеличивается осенью – зимой.



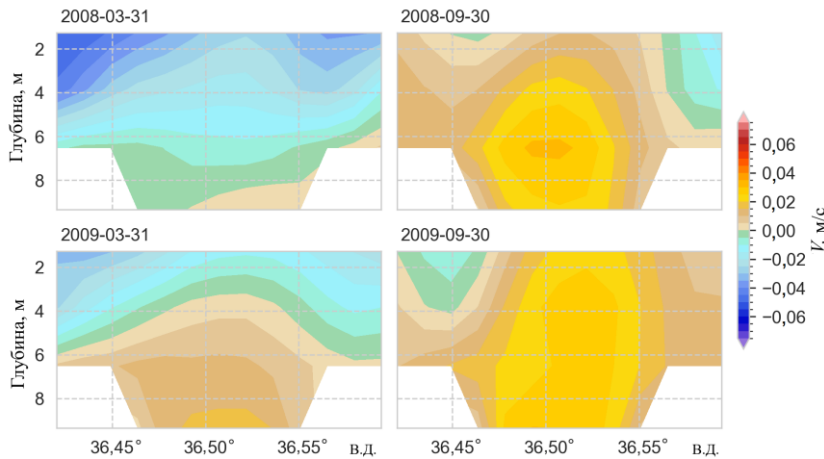
Р и с. 7. Диаграммы глубина – время параметров, осредненных по сечению пролива на широте $45,186^\circ$ с. ш. по результатам эксперимента ВР: *a* – меридиональной скорости течений (положительные значения соответствуют движению из Черного в Азовское море); *b* – солености вод
F i g. 7. Depth-time diagrams of the parameters averaged over the strait cross section at the latitude 45.186° N based on the results of the HR experiment: *a* – of the meridional current velocities (positive values correspond to the movement from the Black Sea to the Azov Sea); *b* – of water salinity

В эксперименте СР отмечалась сходная вертикальная структура интегрального переноса в проливе при высокой его интенсивности, но гораздо хуже прослеживалось формирование двухслойной структуры.

В отличие от пролива Босфор, где почти всегда существует двухслойная структура течений по вертикали с практически постоянными толщинами слоев верхнего и нижнего течений [14], в Керченском проливе потоки разного знака могут занимать произвольную долю площади сечения (рис. 8, *a*). Для репрезентативности на этом рисунке представлена картина течений на 1 апреля 2008 г., соответствующая рис. 6. Как видно, чуть глубже весьма тонкого поверхностного слоя наблюдается относительно мощный приток вод в Азовское море (меридиональная скорость более нуля). В верхнем же слое в обратном направлении (меридиональная скорость менее нуля) происходит перенос вод с пониженной соленостью (см. рис. 6; 8, *a*).



a



b

Р и с. 8. Зональные разрезы гидрофизических параметров в Керченском проливе (вдоль широты 45,186 °с. ш.) по результатам эксперимента ВР: среднесуточных солёности и меридиональной скорости течений ($V > 0$ – течение направлено в Азовское море) (*a*); среднемесячных меридиональных течений в марте и сентябре для двух лет (*b*)

Fig. 8. Zonal sections of hydrophysical parameters in the Kerch Strait (along the latitude 45.186 °N) based on the results of the HR experiment: daily average salinity and daily average meridional current velocity ($V > 0$ – current is directed to the Sea of Azov) (*a*); monthly average meridional currents in March and September for two years (*b*)

Ситуации одновременного развития течений разного знака проявляются и в распределениях среднемесячных течений. Например, в марте 2008 г. средний транспорт вод осуществляется преимущественно в одном направлении (из Азовского моря), а в марте 2009 г. – поток вод в Азовское море выражен гораздо лучше (рис. 8, *b*). В сентябре 2008 и 2009 гг. среднемесячные распределения скоростей более сходны между собой и в обоих случаях происходит разнонаправленный перенос вод в сечении пролива.

Весьма сходную вертикальную структуру с меридиональным переносом имеет усредненная по ширине пролива соленость (см. рис. 6, *c, d*). При формальном разделении на более (выше 15 ЕПС) и менее (13–15 ЕПС) соленые воды хорошо выраженными становятся периоды преобладающего переноса черноморских и азовоморских водных масс соответственно. В эти периоды профиль солености почти однороден по вертикали. В случае постоянно меняющегося ветра становится более выраженной двухслойная вертикальная структура усредненной солености.

Сравнение положений моментов интенсификации течений (см. рис. 6, *a, b*) и максимума/минимума солености вод (см. рис. 6, *c, d*) на временной оси позволяет утверждать о наличии незначительного лага (1–2 сут) между событиями, вероятно обусловленного характерным временем поступления осолоненных или распресненных вод к месту расположения выбранного сечения. Диаграмма на рис. 6, *c, d* подтверждает также тезис об увеличении количества событий притока черноморских вод в период с осени до конца зимы.

Результаты численного моделирования позволяют дать оценку величины однонаправленных потоков воды Q_V и соли Q_S через пролив в направлении Азовского и Черного морей. Воспользуемся соотношениями $Q_V = \iint v dx dz$ и $Q_S = \iint \rho_0 v S dx dz$, где S – соленость; ρ_0 – средняя плотность морской воды; v – меридиональная компонента скорости; x и z – зональная и вертикальная координаты. Количественные значения для азовского и обратного черноморского потоков, полученные по различным данным, представлены в [18]. Наши оценки по результатам эксперимента ВР оказались несколько отличными: среднегодовой отток вод (172,3 км³/год) из Азовского моря незначительно превышает поступление черноморских водных масс в Азовское море (165,4 км³/год). Полученная разница качественно согласуется с оценками из работ [1, 18] (около 20 км³/год), но несколько меньше их. Отметим, что если говорить о 2008–2009 гг., то величина такого оттока может быть скомпенсирована речным стоком. Однако уже к 2018 г. величина последнего уменьшится вдвое.

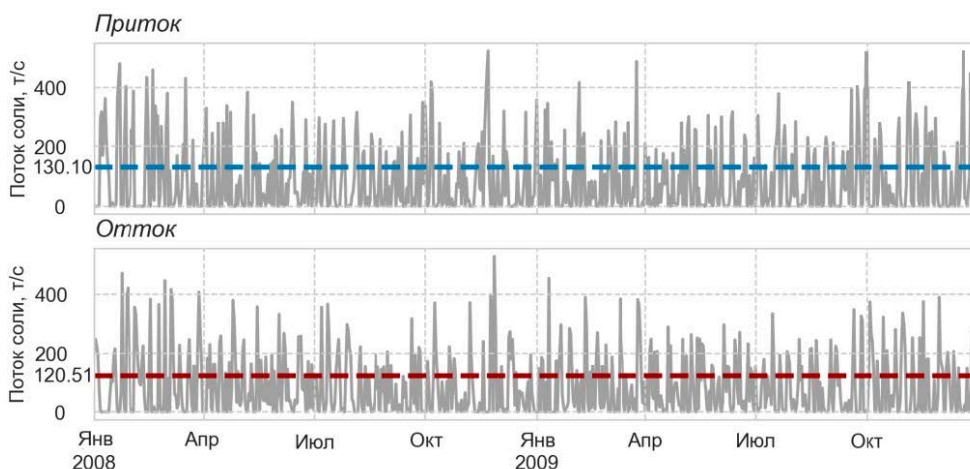


Р и с. 9. Средняя по бассейну Азовского моря соленость вод
F i g. 9. Water salinity average over the Azov Sea basin

Анализ изменения однонаправленных потоков соли (Q_S) через Керченский пролив со временем (рис. 8) показал следующее. Отмечается интенсификация солеобмена в осенне-зимний период, что уже упоминалось

и, по-видимому, является следствием усиления ветра. Отметим, что разница среднегодовых значений однонаправленных потоков соли через пролив противоположна по знаку разнице объемных потоков: поступление соли превышает ее отток из Азовского моря на ≈ 10 т/с (рис. 8). В результате такого превышения наблюдается рост средней по бассейну солёности, аналогичный представленному в работе [19] (рис. 9). Как видно, за 2008–2009 гг. эта величина вырастает почти на 0,7 ЕПС. Отметим, что по результатам эксперимента ВР значения потоков оказались выше, чем в эксперименте СР.

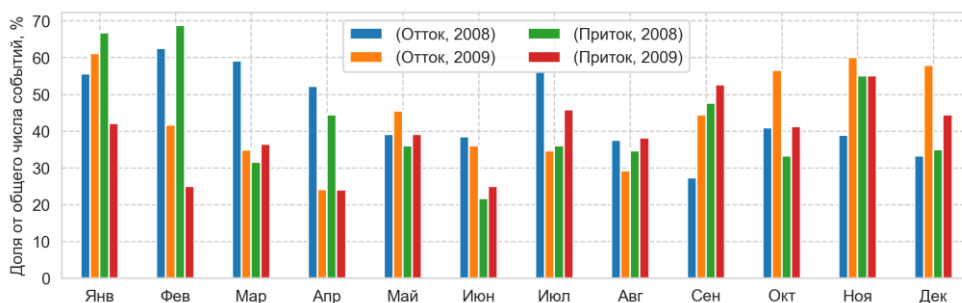
Для оценки вклада перемежаемости потоков соли, вызванной событиями интенсивного ветрового воздействия, мы оценили долю таких событий от общего числа притоков и оттоков. В настоящей работе интенсивными мы считали события с превышением среднегодовых значений однонаправленных потоков соли в Керченском проливе. Оценка этой величины выполнялась без учета дней, в которые поток для анализируемого направления отсутствовал. Таким образом, получены значения ≈ 130 и $\approx 120,5$ т/с для притоков (в Азовское море) и оттоков (в Черное море) соответственно.



Р и с. 10. Изменчивость потока соли через Керченский пролив по результатам эксперимента ВР (сплошная линия – мгновенные значения; штриховая – средние за два года значения)

F i g. 10. Variability of salt flow through the Kerch Strait based on the results of the HR experiment (solid line denote the instantaneous values; dashed line – two-year average ones)

Представление о сезонной изменчивости доли интенсивных потоков соли дает рис. 10. Как видно, события аномального поступления соли в Азовское море преобладают в период осень – зима. В среднем за месяц количество поступившей при исследуемых событиях соли может составлять от приблизительно 20–25 % в июне до почти 70 % в феврале (рис. 11). Причем в 2008 г. это выражено в большей степени. Высокая доля аномальных событий оттока соли наблюдается в январе (около 60 %). Таким образом, в Керченском проливе отмечается довольно весомый вклад перемежаемости массо- и солеобмена в долговременные изменения термохалинных параметров и стратификацию вод в акватории возле пролива.



Р и с. 11. Доля событий с превышением среднегодовых значений однонаправленных потоков соли от общего числа событий

F i g. 11. Portion of the events with the exceeding average annual values in unidirectional salt flows from the total number of events

Выводы

В настоящей работе на основе результатов численного моделирования совместной динамики Азовского и Черного морей с высоким пространственным разрешением выявлен ряд особенностей массо- и солеобмена через Керченский пролив. Их поведение со временем имеет выраженный сезонный характер с интенсификацией в осенне-зимний период. Основным фактором, определяющим изменчивость водообмена между морями, является ветровой режим в регионе. В целом величина водообмена определяется направлением, скоростью и продолжительностью действия ветра.

Перенос азовоморских вод через пролив в Черное море (отток) в основном происходит в виде струи, которая распространяется вдоль восточного и южного побережий Крымского полуострова, первоначально попадая в Феодосийский залив. Менее соленые воды далее могут проследиваться на достаточно больших удалениях от пролива (более 200 км) в полном соответствии со спутниковыми наблюдениями.

Заметное проникновение черноморских вод в Азовское море происходит при весьма интенсивном ветровом воздействии главным образом юго-западных румбов. Этот процесс приводит к формированию обширного пятна вод повышенной солености в течение нескольких дней. Пятно далее перемещается по бассейну циклонически. Несмотря на смешение с окружающими водами, пятно довольно долго проследивается в бассейне. Отмеченные результаты с реконструкцией струйных течений и притоков черноморских вод в Азовское море не отмечались раньше при численном моделировании динамики вод каскада ввиду использования довольно грубого пространственного разрешения. Вместе с тем разработанная региональная конфигурация может быть весьма полезной при планировании экспериментов по идентификации вод в районе пос. Кацивели на базе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона. Очевидно, добиться такого качества моделирования динамических процессов в относительно мелких прибрежной и шельфовых зонах с разрешением около 5 км невозможно.

Если анализировать вертикальную структуру гидрофизических параметров в проливе, то можно видеть, что она также определяется интенсивностью

и продолжительностью ветрового воздействия. При сильных и продолжительных ветрах распределения скорости течений и солёности морской воды в проливе практически однородны по вертикали. Однако в условиях частой смены ветровой циркуляции происходит ослабление течений и последующее формирование вертикальной структуры с адвекцией вод в обе стороны. Такие разнонаправленные потоки могут делить сечение пролива не только по вертикали, но и по горизонтали в произвольном соотношении. Несмотря на то что по измерениям трудно выделить ситуации с такими одновременно существующими потоками, модель демонстрирует ярко выраженную неоднородность течений в проливе даже на синоптических временных масштабах.

Оценки величин притоков и оттоков вод через пролив по результатам моделирования, хотя и несколько превышают значения, полученные ранее на основе других источников из информации (наблюдений, реанализов), тем не менее качественно согласуются с общепринятым фактом – их разница отрицательна, т. е. бассейн Азовского моря через Керченский пролив в среднем теряет за год объём $\approx 20 \text{ км}^3$ (оценки по результатам моделирования дают значение около 8 км^3). Такая особенность водообмена через пролив может рассматриваться как одна из причин осолонения бассейна в последние годы, особенно с учетом наблюдаемого уменьшения речного стока. И если в 2008 г. величина речного стока оказалась близкой к величине оттока через Керченский пролив, то уже в 2018 г. речной сток уменьшился вдвое, что, вероятно, усилит наблюдаемое осолонение вод бассейна.

Анализ потоков соли через пролив показал, что, хотя отмечена небольшая разница однонаправленных суммарных потоков воды, разница значений солёности между азовоморскими и черноморскими водными массами приводит к преобладанию потока соли в Азовское море (приток). Это также способствует осолонению вод бассейна. Если выделять события интенсивных заток соли в Азовское море, то доля таких событий составляет от 20–25 % до почти 70 %. Отметим, что использование в данной работе высокого пространственного разрешения для численного моделирования циркуляции дало новые результаты. Однако они должны восприниматься с определенной осторожностью и нуждаются в сопоставлении с более регулярными наблюдениями термохалинных параметров в проливе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IV. Черное море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1991. 235 с.
2. *Альтман Э. Н., Толмазин Д. М.* Метод расчета течений и водообмена в Керченском проливе // *Океанология*. 1970. Т. 10, № 3. С. 438–447.
3. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алескерова [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 6. С. 53–64. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-53-64
4. Water exchange between the Sea of Azov and the Black Sea through the Kerch Strait / I. Zavialov [et al.] // *Ocean Science*. 2020. Vol. 16, iss. 1. P. 15–30. <https://doi.org/10.5194/os-16-15-2020>
5. *Иванов В. А., Шапиро Н. Б.* Моделирование течений в Керченском проливе // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. Вып. 10. С. 207–232.

6. *Фомин В. В., Лазоренко Д. И., Фомина И. Н.* Численное моделирование водообмена через Керченский пролив для различных типов атмосферных воздействий // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 4. С. 82–93. doi:10.22449/0233-7584-2017-4-82-93
7. Моделирование динамики вод в Керченском проливе и предпроливных зонах / под ред. В. А. Иванова. Севастополь : МГИ, 2010. 206 с.
8. Система морских ретроспективных расчетов и прогнозов гидрометеорологических характеристик Азовского моря и Керченского пролива / Н. А. Дианский [и др.] // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2020. Т. 2, № 5. С. 131–140. EDN GBWEBF. doi:10.23885/2500-123X-2020-2-5-131-140
9. *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. doi:10.1007/s10236-017-1071-2
10. NEMO Ocean Engine / G. Madec [et al.]. France : Institut Pierre-Simon Laplace. (Note du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace ; No. 27). URL: <https://www.nemo-ocean.eu/doc/node1.html> (date of access: 05.03.2023).
11. *Mesinger F., Arakawa A.* Numerical Methods Used in Atmospheric Models. WMO-ICSU Joint Organizing Committee, 1976. Vol. 1. 64 p. (GARP Publications Series ; No. 17).
12. *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>
13. Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихререзающей 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
14. *Мизюк А. И., Коротаев Г. К.* Черноморские внутривихревые линзы по результатам численного моделирования циркуляции бассейна // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56, № 1. С. 112–122. doi:10.31857/S0002351520010101
15. *Roulet 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>
16. *Mizyuk A. I., Puzina O. S.* Sea ice modeling in the Sea of Azov for a study of long-term variability // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 386. 012023. doi:10.1088/1755-1315/386/1/012023
17. *Толкаченко Г. А., Маньковский В. И., Соловьев М. В.* Гидрооптические наблюдения в прибрежных водах Южного берега Крыма летом и осенью 2001 г. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2003. Вып. 2 (7). С. 93–99.
18. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с.
19. *Mizyuk A. I., Lishaev P. N., Puzina O. S.* Estimation of the Azov Sea state based on the Black Sea hydrography // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1675. 012120. doi:10.1088/1742-6596/1675/1/012120

Сведения 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

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

Коротаев 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