

Научная статья

УДК 551.465+551.468

EDN: QIUMIK

Пространственная структура течений Азовского моря по данным численного моделирования

Б. В. Дивинский

Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН, Москва, Россия

✉ divin@ocean.ru

Поступила в редакцию 02.06.2025; одобрена после рецензирования 12.08.2025;
принята к публикации 10.09.2025.

Аннотация

Цель. Получены климатические пространственные поля течений на акватории Азовского моря. *Методы и результаты.* На основе математического моделирования с использованием объединенной гидродинамической модели, учитывающей взаимосвязь морских течений и ветрового волнения в условиях мелкого моря, верифицированной с привлечением доступных экспериментальных данных параметров морских течений, ветрового волнения и уровня моря, выполнены расчеты параметров морских течений на акватории Азовского моря за 45-летний климатический период (январь 1979 – декабрь 2023 г.). Установлена трехмерная пространственная структура поверхностных и придонных течений Азовского моря. Выявлено, что основным ее элементом является обширный циклонический круговорот, охватывающий всю толщу вод в центральной части моря. В западной части моря течения в поверхностном слое формируют локальные вихревые структуры с генеральным переносом вод в сторону косы Арабатская Стрелка, а в придонном – антициклонический вихрь с общим переносом вод от Арабатской Стрелки в направлении на северо-восток. Определены зоны наиболее интенсивных течений: Должанский пролив, соединяющий основную акваторию и Таганрогский залив; Таганрогский залив; оконечности кос северного побережья, а также южная часть моря, примыкающая к Керченскому проливу. В этих зонах максимальная скорость поверхностных течений достигает ~ 1,2 м/с (в проливе – 1,5 м/с), а придонных – 0,6–0,7 м/с.

Выводы. Проведенное исследование позволило впервые получить раздельные климатические поля поверхностных и придонных течений Азовского моря, выявив сложную вертикальную структуру циркуляции его вод. Полученные результаты формируют основу для решения фундаментальных и прикладных задач, включая навигацию, оценку переноса донных наносов и экологический мониторинг.

Ключевые слова: Азовское море, численное моделирование, климатические поля течений, циркуляция вод

Благодарности: формирование базы данных параметров морских течений и настройка численной модели выполнены в рамках госзаданий ИО РАН FMWE-2024-0027 и 8.5. Постановка задачи, обработка и анализ результатов выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00104, <https://rscf.ru/project/25-17-00104>.

Для цитирования: Дивинский Б. В. Пространственная структура течений Азовского моря по данным численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 6. С. 843–854. EDN QIUMIK.

Spatial Structure of Sea Currents in the Sea of Azov Based on Numerical Modeling Data

B. V. Divinsky

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ divin@ocean.ru

Purpose. The purpose of the study is to obtain climatic spatial fields of currents in the Sea of Azov water area.

Methods and Results. The parameters of sea currents in the Azov Sea water area are calculated for a 45-year climatic period (January 1979 – December 2023) based on mathematical modeling and using a combined hydrodynamic model which took into account the relationship between the sea currents and wind waves under conditions of shallow water and was verified by available experimental data on the parameters of sea currents, wind waves and sea level. Three-dimensional spatial structure of the surface and bottom currents in the Sea of Azov is established. It is revealed that its main element is a vast cyclonic gyre covering the entire water thickness in the central part of the sea. In the sea western part, surface currents form the local eddy structures with a general water transfer directed towards the Arabat Spit, and bottom ones form an anticyclonic eddy with a general water transfer from the Arabat Spit to the northeast. The areas of the most intense currents are identified: the Dolzhansky Strait connecting the main water area and Taganrog Bay; Taganrog Bay; the ends of spits at the northern coast, and also the southern part of the sea adjacent to the Kerch Strait. In these areas, the maximum speed of surface currents achieves ~ 1.2 m/s (in the strait it is 1.5 m/s), and that of bottom ones – 0.6–0.7 m/s.

Conclusions. The performed study made it possible for the first time to obtain separate climatic fields for the surface and bottom currents in the Sea of Azov having revealed the complex vertical structure of its circulation. The obtained results provide a basis for solving the fundamental and applied problems that include navigation, assessment of bottom sediment transport, and environmental monitoring.

Keywords: Sea of Azov, numerical modeling, climatic fields of currents, water circulation

Acknowledgments: Formation of the sea current parameters database, and setting up of the numerical model were carried out within the framework of state assignments of IO RAS FMWE-2024-0027 and 8.5. The problem was formulated, and the results were processed and analyzed with the support of Russian Science Foundation grant No. 25-17-00104, <https://rscf.ru/project/25-17-00104>.

For citation: Divinsky, B.V., 2025. Spatial Structure of Sea Currents in the Sea of Azov Based on Numerical Modeling Data. *Physical Oceanography*, 32(6), pp. 861-870.

Введение

Вопрос о средней (климатической) циркуляции вод Азовского моря до сих пор остается открытым и в определенной степени дискуссионным. Схемы циркуляции вод, представленные в справочнике ¹, а также в работах ряда авторов (например, [1–5]), как правило, отражают определенные условия – конкретные сезонные или штормовые режимы, метеорологические условия с заданными направлениями и скоростями воздушных потоков – и не могут рассматриваться в качестве климатических обобщений. Вместе с тем циркуляция в Азовском море (как и в любом другом бассейне) обусловлена множеством факторов: ветровым воздействием, донным трением, особенностями батиметрии,

¹ Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3 : Азовское море. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1986. 218 с.

конфигурацией береговой линии, сгонно-нагонными процессами и собственными колебаниями уровня. В условиях мелководного моря это закономерно приводит к формированию трехмерной структуры течений. Отметим, что в работе [6] представлена климатическая картина осредненных по глубине течений в акватории Азовского моря и показано, что центр моря занимает обширный циклонический круговорот, а в западной части генеральное движение вод осуществляется в антициклоническом направлении. Однако вопрос о вертикальной дифференциации течений в климатическом масштабе остается нерешенным.

Основной целью данной работы является получение и анализ климатических полей поверхностных и придонных течений Азовского моря, рассматриваемых отдельно. Такой подход имеет важное практическое значение: поверхностные течения влияют на навигацию, а придонные являются одним из определяющих факторов взвешивания и перераспределения донного материала.

Материалы и методы

Азовское море – относительно небольшой водоем ² с характерными линейными размерами основной чаши 250 × 150 км и средней глубиной ~ 7 м. Для него характерно чередование участков эрозии и аккумуляции донного материала с широким развитием различных геоморфологических форм, таких как песчаные косы, банки, заливы ³ (рис. 1). Центральную часть моря занимает пологая аккумулятивная равнина Панова с характерными глубинами 10–12 м.

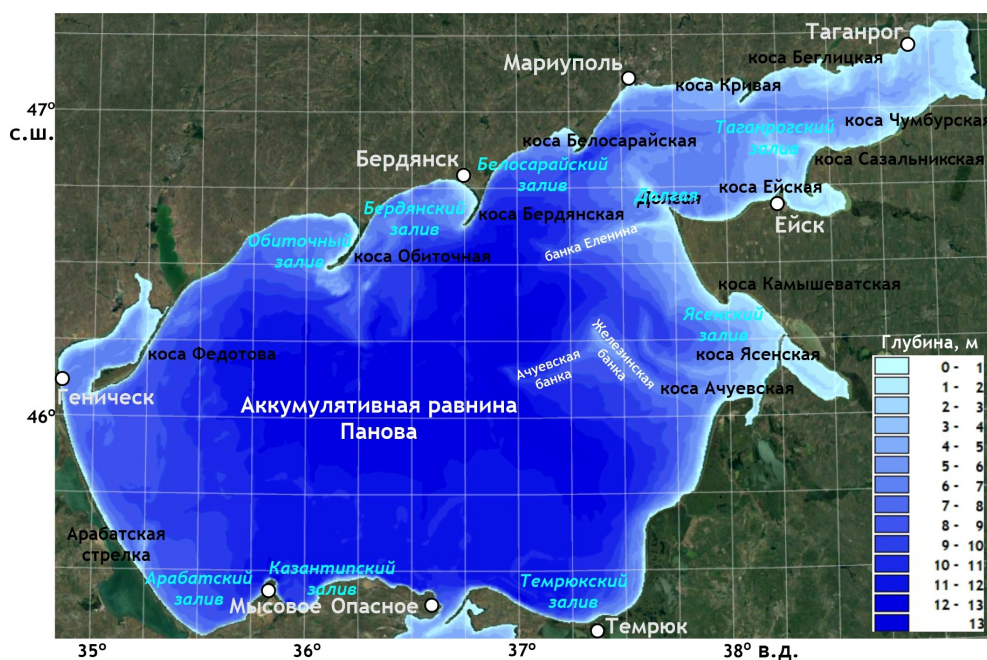


Рис. 1. Морфометрические и батиметрические особенности Азовского моря (согласно атласу ³)
Fig. 1. Morphometric and bathymetric features of the Sea of Azov (according to atlas ³)

² Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. Москва : Изд-во МГУ, 1982. 192 с.

³ Экологический атлас Азовского моря / гл. ред. акад. Г. Г. Матишов. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 328 с.

Среди основных морфодинамических и гидрологических особенностей моря выделим довольно протяженные области мелководья, а также возможное формирование ледового покрытия в части или по всей акватории моря. Кроме того, при определенных условиях высоты штормовых нагонов вполне соизмеримы с локальными глубинами. С учетом этих обстоятельств необходимо совместное использование моделей морских течений и поверхностного ветрового волнения, объединенных в единый расчетный блок. В настоящем исследовании используется сопряженная схема, интегрирующая 5-слойную (σ -координатную) гидродинамическую модель течений *ADCIRC* (*Advanced Circulation model*) и спектральную волновую модель *MIKE 21 SW*, с помощью которой рассчитываются параметры ветрового волнения. В модель *ADCIRC* включены алгоритмы, позволяющие учитывать процессы осушения или затопления прибрежной зоны.

Модели связаны двусторонней связью: данные о параметрах течений и возвышений уровня моря используются в спектральной волновой модели; значения радиационных напряжений, возникающие вследствие обрушения волн, передаются в гидродинамическую модель с последующей коррекцией картины течений.

В качестве граничных условий использовались поля приземного атмосферного давления и скорости ветра из реанализа *ERA5*. Для учета влияния ледового покрова применялись суточные поля концентрации льда из того же реанализа. Пространственное разрешение составляет $0,125^\circ$ по широте и долготе, шаг по времени – 3 ч для давления и скоростей ветра, 24 ч – для концентрации льда. Отметим, что в подобном формате постановки задачи работа проведена впервые.

Вопросы верификации модели подробно изложены в работе [6]. Адекватность модели проверена по всем доступным массивам натурных данных.

1. *Ледовая обстановка.* В модели используются пространственные карты концентрации льда на прямоугольной сетке 40×20 ячеек, каждая ячейка размером $9,8 \times 13,8$ км. Несмотря на относительно грубое разрешение, эти карты обладают несомненными достоинствами. Во-первых, они покрывают весь расчетный период. Во-вторых, позволяют уточнить параметры течений, волнения и уровня моря в зимний период, поскольку ледовый покров существенно редуцирует степень ветрового воздействия на подстилающую поверхность.

2. *Уровень моря.* Благодаря широкой сети мониторинговых станций наблюдения, этот гидродинамический параметр является наиболее изученным. Верификация проведена по рядам срочных наблюдений с береговых станций [7–9].

3. *Поля течений.* Для Азовского моря характерен острый дефицит инструментальных измерений параметров течений и волнения, который, возможно, связан с тем, что установка долговременных донных станций на мелководье сталкивается с проблемой подвижности придонного материала (песка,

ила). При этом имеющиеся в открытом доступе данные наблюдений носят эпизодический характер. Выделим исследования, проведенные в апреле и августе 2006 г. [10]. Для верификации гидродинамической модели использованы пространственные карты распределения скоростей течений, полученные в результате этих исследований.

4. *Ветровое волнение*. Модель верифицирована по единственному длительному ряду инструментальных наблюдений за параметрами поверхностного волнения, полученному в октябре 2004 г. с помощью донной станции *ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)* в центре моря⁴. В дополнение к этим данным использовались результаты спутниковых измерений значительных высот волн на акватории моря. Отметим, что качество исходных данных измерений, выполненных на стационарных гидрометеорологических постах, а также попутных (судовых) наблюдений нуждается в анализе.

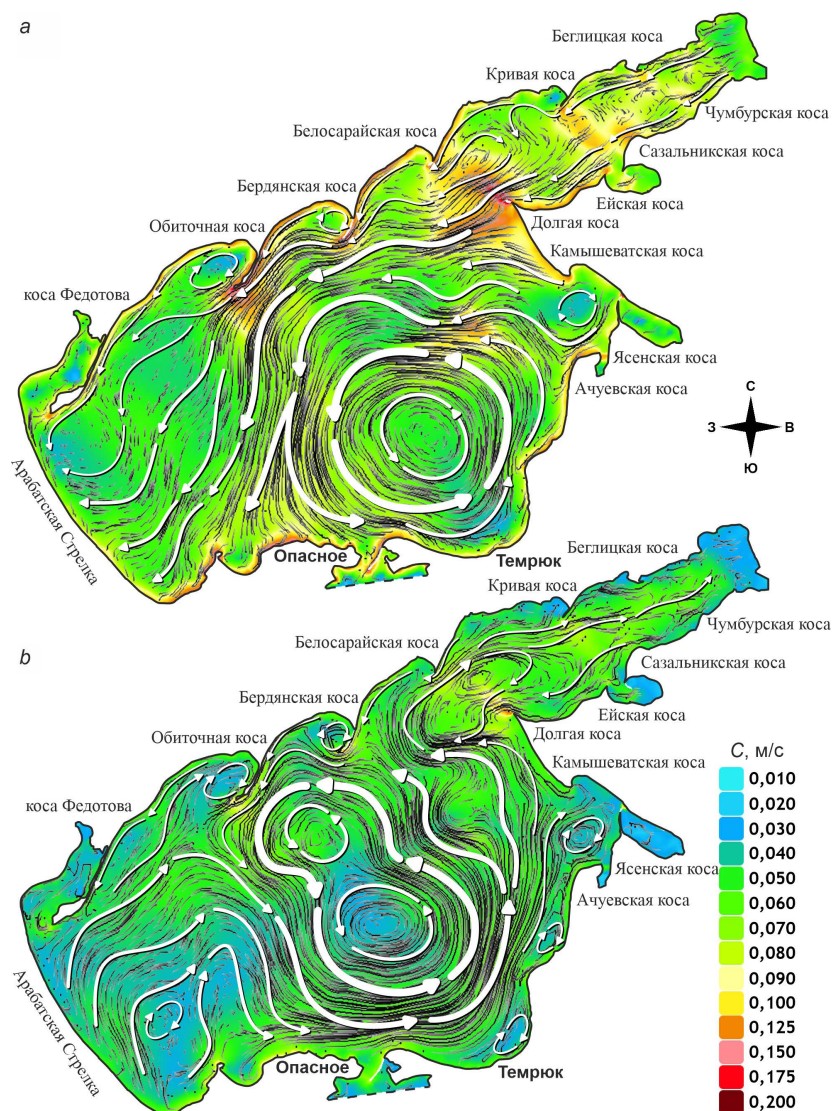
Таким образом, объединенная модель верифицирована с привлечением доступных экспериментальных данных параметров морских течений, ветрового волнения и уровня моря. Данные включают в себя результаты измерений, выполненных с помощью специализированных приборов (мареографов, *RDI ADCP*, зонда «Вектор-2»), а также спутниковые наблюдения.

Расчеты параметров морских течений на акватории Азовского моря выполнены с января 1979 по декабрь 2023 г., что составляет климатический период в 45 лет. Расчетными величинами являются трехмерные пространственные поля морских течений Азовского моря. Дискретность выходных данных – 1 ч.

Результаты и обсуждение

Использование при моделировании актуальных карт ледовой обстановки позволило получить (что крайне важно) непрерывные за 45 лет ряды параметров морских течений. Их осреднение за весь расчетный срок дает возможность построить климатические поля течений на акватории Азовского моря. (Используемые в тексте выражения «климатические поля течений», «климатические течения» применяются исключительно в контексте расчетов и относятся к расчетному климату.) На рис. 2 представлены средние скорости и генеральные направления течений в поверхностном и придонном слоях.

⁴ Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2006. 452 с.



Р и с. 2. Климатические течения Азовского моря: *a* – поверхностные; *b* – придонные
Fig. 2. Climatic currents of the Sea of Azov: *a* – surface and *b* – bottom ones

Основные особенности структуры климатических течений:

1. *Поверхностные течения.* Вся центральную часть моря занимает обширный **циклонический круговорот**, частично захватывающий восточную область. В западной части моря формируются локальные вихревые структуры с генеральным переносом вод в сторону Арабатской Стрелки. В Ясенском заливе, а также с наветренных сторон Бердянской и Обиточной кос наблюдаются устойчивые антициклонические вихри. В Таганрогском заливе осуществляется вынос вод вдоль северного и южного побережий. Самые сильные течения с максимальными средними скоростями, превышающими 0,15 м/с в проливе, направлены из Таганрогского залива вдоль кос северного побережья. Средняя по акватории скорость течений составляет 0,07 м/с.

2. *Придонные течения.* В центральной части моря также формируется **циклонический вихрь**, вытянутый по линии СЗ-ЮВ с двумя ярко выраженными центрами. На периферии этого вихря, в южной и восточной прибрежных областях моря, наблюдаются устойчивые антициклонические вихри. В западной части моря выделяется слабо выраженный антициклонический вихрь с общим переносом вод от косы Арабатская Стрелка в северо-восточном направлении. Отмеченные выше антициклонические круговороты в Ясенском заливе, в районе Обиточной и Бердянской кос, характерные для поверхностных течений, сохраняются и в придонном слое. Из основной акватории моря придонные воды распространяются вдоль оси Таганрогского залива на северо-восток. Максимальные средние скорости (0,11 м/с) фиксируются в проливе в районе косы Долгой; средняя скорость для всего моря составляет 0,05 м/с.

Таким образом, основным элементом климатической структуры течений Азовского моря является обширный циклон, охватывающий всю толщу вод центральной части моря. К подобному выводу приходили и многие другие исследователи, ориентируясь в основном на сопутствующие наблюдения и явления. В справочнике ⁵ находим: «Основное течение собственно Азовского моря (без Таганрогского залива) образует круговорот вдоль берегов, направленный против движения часовой стрелки...». Этой же точки зрения придерживался выдающийся советский океанолог Н. М. Книпович [11, с. 310], отмечая, что «...круговое течение Азовского моря мы должны представлять себе не как непрерывное движение масс воды в одном определенном направлении, а как общий результат, как равнодействующую всей совокупности передвижений воды».

В какой-то степени подтверждением полученной расчетным путем климатической картины течений может служить отчет британского капитана Осборна, опубликованный в 1857 г. [12]. Как пишет Осборн [12, р. 147–148], через шесть недель после военных операций английского флота против русских торговых судов южнее Бердянска деревянными обломками была усеяна вся Арабатская Стрелка. Ориентируясь на карту поверхностных течений (рис. 2, а), можно определить длину трека от Бердянска до середины Арабатской Стрелки: она составляет ~ 200 км; при средней скорости течений в 0,05 м/с время достижения косы плавающими обломками – приблизительно 6,5 недель. Таким образом, полученная структура глобальной (в масштабах моря) циркуляции вод объясняет высокую вероятность таких событий, хотя конкретные поля течений могут, естественно, отличаться от климатических.

Помимо основных направлений, в структуре климатических течений обнаруживаются устойчивые вихри различного знака. Одним из показателей вихревой структуры водного потока является число Россби [13], определяемое

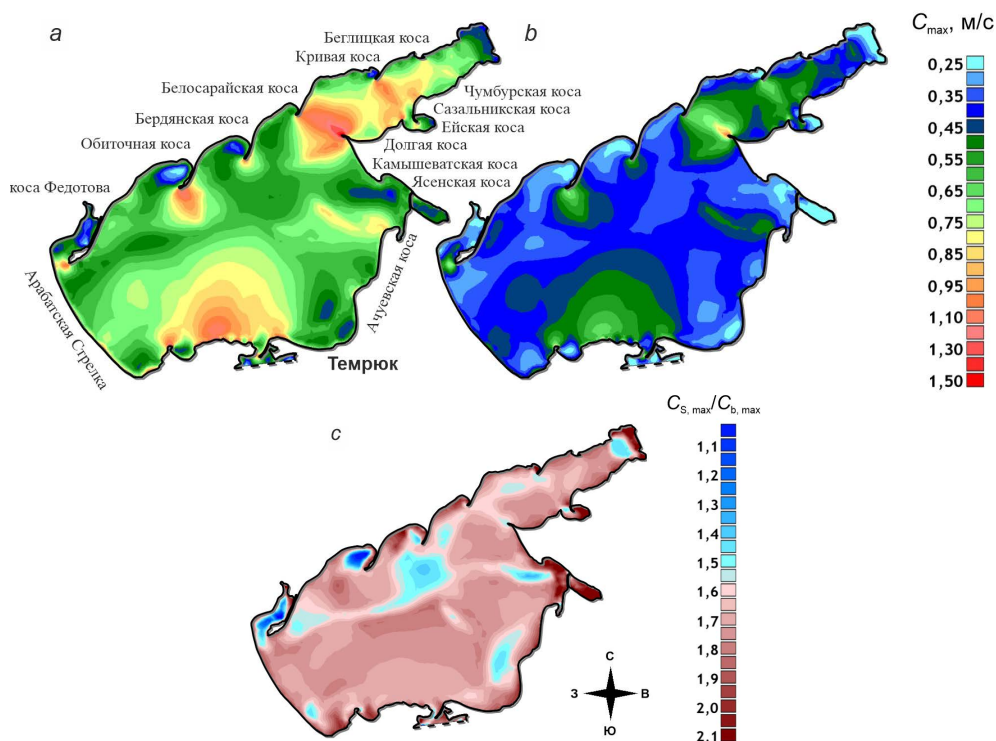
выражением $Ro = \omega/f$, где $\omega = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ – горизонтальная завихренность поля

течений (u, v – компоненты скорости); f – параметр Кориолиса. В областях циклонической завихренности число Ro положительно, антициклонической – отрицательно (рис. 3).

⁵ Лощия Азовского моря : издание Главного гидрографического управления 1916 года. Петербург : Тип. Морского министерства, 1916. С. LXXV.

спутниковых снимках, что – в определенной степени – может служить подтверждением полученных результатов.

Еще один аспект, на который хотелось бы обратить внимание, – это распределение максимальных скоростей на акватории моря. На рис. 4 приведены карты максимальных расчетных скоростей течений в двух слоях, а также отношение скоростей в поверхностном слое к скоростям в придонном.



Р и с. 4. Максимальные скорости течений в поверхностном (а) и придонном (b) слоях, а также их соотношение (с)

F i g. 4. Maximum current velocities in the surface (a) and bottom (b) layers, as well as their ratio (c)

Как следует из рис. 4, на акватории Азовского моря возможны весьма сильные течения, особенно в Должанском проливе, соединяющем основную акваторию и Таганрогский залив, в самом Таганрогском заливе, на оконечностях кос северного побережья, а также в южной части моря, примыкающей к Керченскому проливу. В этих районах максимальные скорости поверхностных течений достигают ~1,2 м/с (причем в проливе они могут составлять 1,5 м/с), а придонных – 0,6–0,7 м/с. В целом почти по всему морю скорости поверхностных течений в полтора-два раза превосходят скорости придонных, за исключением наветренных сторон кос северного побережья и небольших участков открытого моря. Отметим, что в справочнике¹ приведены оценки скоростей течений 1%-ной обеспеченности в поверхностном слое, составляющие 1,0–1,1 м/с. Там же указано, что в 1969 г. в проливе, разделяющем Таганрогский залив и основное море, наблюдались течения со скоростью 1,4 м/с (к сожалению, без ссылки на условия регистрации).

Еще один интересный факт. Следуя рекомендациям справочника ¹, максимальную скорость придонных течений можно получить, разделив скорости поверхностных течений на два. Как следует из рис. 4, несмотря на очевидную условность определения параметров течений, принятую в справочнике (поля течений рассчитываются по восьми характерным направлениям), представленные в нем оценки хорошо соответствуют результатам наших численных расчетов по реальным полям ветра.

Выводы

Основная цель работы заключалась в получении климатических пространственных полей течений на акватории Азовского моря методами математического моделирования. Любая численная модель обладает, как представляется, своими преимуществами и недостатками, в компромиссе между которыми и заключается, по сути, эффективность модели.

В основе нашего исследования лежала объединенная гидродинамическая модель. Преимущества этой модели следующие:

1. Учет взаимного влияния течений, нагонов и поверхностного волнения, что крайне важно в условиях мелководья.
2. Трехмерная структура модели, позволившая впервые получить отдельные климатические поля поверхностных и придонных течений.
3. Учет сезонного ледового покрова.
4. Выполнение расчетов за продолжительный 45-летний период (январь 1979 – декабрь 2023 г.), что соответствует климатическому масштабу.

Верификация представленной объединенной модели показала хорошее соответствие расчетных данных натурным измерениям, что подтверждает ее адекватность и возможность использования в качестве инструмента исследований.

Основные результаты работы:

1. Главным элементом климатической структуры течений Азовского моря является обширный **циклонический круговорот**, охватывающий всю толщу вод центральной части моря.

2. В западной части моря в поверхностном слое течения образуют локальные вихревые структуры с генеральным переносом вод в сторону Арабатской Стрелки. Самые интенсивные течения с максимальными средними скоростями, превышающими 0,15 м/с, направлены из Таганрогского залива вдоль кос северного побережья. Средняя по акватории скорость поверхностных течений составляет 0,07 м/с.

3. В придонном слое циклонический вихрь характеризуется двумя ярко выраженными центрами. В западной части моря выделяется слабо сформированный антициклонический вихрь с общим переносом вод от Арабатской Стрелки в направлении на северо-восток. Максимальная средняя скорость наблюдается в проливе в районе косы Долгой (0,11 м/с); средняя скорость для всего моря – 0,05 м/с.

4. Самые сильные течения формируются в Должанском проливе, соединяющем основную акваторию моря и Таганрогский залив, в самом Таганрогском заливе, на оконечностях кос северного побережья, а также в южной части моря, примыкающей к Керченскому проливу. В этих районах максимальная

скорость поверхностных течений составляет $\sim 1,2$ м/с (в проливе может достигать значения 1,5 м/с), придонных – 0,6–0,7 м/с.

При проведении расчетов не учитывались речной сток и водообмен через Керченский пролив, поскольку их корректный учет требует ретроспективных данных высокой временной детализации за весь 45-летний период и объединения Азовского и Черного морей в единую модель, что представляет собой отдельную масштабную задачу.

Таким образом, представленная модель и полученные с ее помощью результаты формируют надежную основу для изучения климатической циркуляции Азовского моря и могут быть использованы для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фомин В. В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ, 2002. Вып. 249. С. 246–255.
2. *Матишов Г. Г., Матишов Д. Г.* Новые принципы представления циркуляции вод Азовского моря // Моделирование и анализ гидрологических процессов в Азовском море. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 196–202. (Труды ЮНЦ РАН ; т. 4).
3. *Фомин В.В., Полозок А.А., Фомина И.Н.* Моделирование циркуляции вод Азовского моря с учетом речного стока // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 16–28. EDN VBUSOP. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-1-16-28>
4. *Матишов Г. Г., Григоренко К. С.* Динамический режим Азовского моря в условиях осолонения // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 492, № 1. С. 107–112. EDN IOCNCJ. <https://doi.org/10.31857/S268673972005014X>
5. *Матишов Г. Г., Григоренко К. С.* Течения Азовского моря в период маловодья Дона // Океанология. 2021. Т. 61, № 2. С. 198–208. EDN XXAHNM. <https://doi.org/10.31857/S0030157421020131>
6. *Дивинский Б. В., Косьян Р. Д., Фомин В. В.* Климатические поля морских течений и ветрового волнения Азовского моря // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 501, № 1. С. 94–107. EDN ANVNAF. <https://doi.org/10.31857/S2686739721090085>
7. *Фомин В. В., Полозок А. А.* Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. Вып. 27. С. 139–145.
8. *Попов С. К., Лобов А. Л.* Моделирование изменений уровня Азовского моря в 2015–2016 годах // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 131–143. EDN YRYHWZ.
9. *Попов С. К., Лобов А. Л.* Краткосрочные прогнозы колебаний уровня Азовского моря в безледный период 2017 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3(369). С. 104–118. EDN VMYBYW.
10. Результаты изучения течений Азовского моря в 2006 г. с использованием прибора нового поколения «Вектор-2» // С. В. Жукова [и др.] // Вопросы рыболовства. 2008. Т. 9, № 4(36). С. 832–838. EDN KTXKOH.
11. *Книпович Н. М.* Гидрологические исследования в Азовском море. М., 1932. 496 с. (Труды Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции ; вып. 5).
12. *Osborn S.* On the Geography of the Sea of Azov, the Putrid Sea, and Adjacent Coasts, & c. // The Journal of the Royal Geographical Society of London. 1857. Vol. 27. P. 133–148. <https://doi.org/10.2307/1798371>
13. О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа / А. Г. Зацепин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 3. С. 16–25. EDN WNAFSL. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-3-16-25>

14. Мисиров С. А., Беспалова Л. А. Оценка динамики бровки клифа в береговой зоне Таганрогского залива на основе данных ДЗЗ и ГИС // Береговая зона морей России в XXI веке : тезисы докладов XXX всероссийской конференции, г. Москва, 3–7 июня 2024. Москва : Географический факультет МГУ, 2024. С. 53–54.

Об авторе:

Дивинский Борис Васильевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **SPIN-код: 2027-8359, ORCID ID: 0000-0002-2452-1922, ResearcherID: C-7262-2014**, divin@ocean.ru