

Климатические потоки донных осадков в Азовском море

Б. В. Дивинский ✉, Р. Д. Косьян

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

✉ divin@ocean.ru

Поступила в редакцию 24.01.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2022;
принята к публикации 15.03.2022

Аннотация

Цель. Цель работы заключается в получении общей картины транспорта наносов в Азовском море за климатический отрезок времени.

Методы и результаты. Исследования проведены методами численного моделирования с использованием современных гидродинамической и волновой моделей, а также модели транспорта наносов, учитывающей комбинированное воздействие морских течений и ветрового волнения. Выполнены расчеты гидродинамических параметров Азовского моря за 42 года – с 1979 по 2020 г. Выходной массив данных состоит из ежечасных пространственных полей скоростей и направлений течений на пяти σ -горизонтах, интегральных характеристик ветрового волнения (высот, периодов, направлений распространений), уровней моря, а также потоков донного вещества. Общая длина массива позволяет детально анализировать отдельные гидродинамические ситуации, сезонные особенности, а также производить климатические обобщения. В результате проведенной работы получено качественное представление о глобальном (в масштабе моря) транспорте донных отложений в Азовском море.

Выводы. Климатические черты транспорта донных отложений в Азовском море: 1) основной поток формируется в виде обширного циклона, охватывающего центральную часть моря, в который вовлекаются донные осадки с западной и восточной прибрежных частей моря; 2) на северном побережье, в районе оконечности Обиточной косы, встречаются два потока: один, преобладающий, со стороны Бердянской косы, второй, менее выраженный, со стороны косы Федотова; результирующий поток образует обширные отмели к югу от Обиточной косы; 3) наиболее сильные потоки формируются у Бердянской и Обиточной кос, а также в районе косы Долгой.

Ключевые слова: математическое моделирование, Азовское море, течения, ветровое волнение, потоки донных отложений, донные осадки

Благодарности: постановка задачи выполнена в рамках проекта РФФ № 20-17-00060, математическое моделирование и вычислительная часть – при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00009. Анализ результатов выполнен в соответствии с темой госзадания № 0128-2021-0013.

Для цитирования: Дивинский Б. В., Косьян Р. Д. Климатические потоки донных осадков в Азовском море // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 312–323. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-312-323

Climatic Fluxes of Bottom Sediments in the Sea of Azov

B. V. Divinsky ✉, R. D. Kosyan

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

✉ divin@ocean.ru

Abstract

Purpose. The work is aimed at obtaining a general picture of sediment transport in the Sea of Azov over a climatic period.

© Дивинский Б. В., Косьян Р. Д., 2022

Methods and Results. The research was carried out by the numerical modeling methods using modern hydrodynamic and wave models, as well as the sediment transport model that takes into account the combined effects of sea currents and wind waves. The Azov Sea hydrodynamic parameters for 42 years – from 1979 to 2020 – were calculated. The output database consists of the hourly spatial fields of the currents' velocities and directions on five σ -horizons, integral characteristics of the wind waves (heights, periods and directions of propagation), the sea levels and the bottom matter fluxes. The total length of the array makes it possible to analyze in details the individual hydrodynamic situations and seasonal features, and also to make climatic generalizations. The carried out studies resulted in obtaining a qualitative idea of the bottom sediments global (sea-scale) transport in the Sea of Azov.

Conclusions. Climatic features of the bottom sediment transport in the Sea of Azov are the following: 1) the main flux is formed as an extensive cyclone that covers the central part of the sea and involves bottom sediments from the western and eastern parts of the sea coast; 2) on the northern coast, near the tip of the Obitochnaya Spit, there are two flows: the first one, predominant, is from the Berdyanskaya Spit, and the second one, less pronounced, is from the Fedotov Spit; the resulting flux forms extensive shoals to the south of the Obitochnaya Spit; 3) the strongest fluxes are formed at the Berdyanskaya and Obitochnaya spits, as well as in the area of the Dolgaya Spit.

Keywords: mathematical modeling, Sea of Azov, currents, wind waves, sediment flows, bottom sediments

Acknowledgements: the problem was stated within the framework of the Russian Science Foundation project No. 20-17-00060, mathematical modeling and computations were done with the support of the RFBR grant No. 20-05-00009. The results were analyzed in accordance with the theme of state assignment No. 0128-2021-0013.

For citation: Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2022. Climatic Fluxes of Bottom Sediments in the Sea of Azov. *Physical Oceanography*, 29(3), pp. 291-302. doi:10.22449/1573-160X-2022-3-291-302

Введение

Морфологический облик любого водоема определяется его геологическими и литодинамическими особенностями (строение дна, состав и мощность донных отложений), а также комплексом внешних гидродинамических факторов, способствующих перераспределению донных осадков в пределах водной акватории и формированию береговой линии. В связи с этим особый интерес представляет построение климатических пространственных карт потоков донного вещества: такие карты отражают генеральные направления перемещения осадков. В настоящее время для Азовского моря подобные обобщающие карты (карты потоков) отсутствуют.

Отметим, что за последние несколько десятков лет усилиями многих специалистов получены интересные и важные данные о строении донных осадков, процессах седиментогенеза и осадконакопления в акватории моря (исследования¹ и работы [1–3]). Отдельные исследования результирующих направлений и магнитуд (т. е. величин) потоков донного материала носили выраженный региональный характер и были связаны в основном с анализом механизмов заносимостей портов и подходных морских каналов.

¹ Сорокина В. В. Особенности терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века : автореферат дис. ... канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 2006. 25 с. ; Ивлиева О. В. Техногенный седиментогенез в Азовском море : автореферат дис. ... д-ра геогр. наук. Ростов-на-Дону, 2007. 48 с. ; Польшин В. В. Закономерности формирования современных донных отложений Азовского моря : автореферат дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск, 2010. 28 с. ; Экологический атлас Азовского моря / Гл. ред. Г. Г. Матишов. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 325 с.

В целом миграция наносов представляет собой определенную проблему как в глобальных, в масштабах всего моря, задачах (обеспечение безопасности мореходства), так и в локальных (сохранение устойчивости пляжей). Приведем несколько цифр, позволяющих в какой-то мере судить о динамике наносов в бассейне Азовского моря. Администрация морских портов Украины (URL: <http://www.uspa.gov.ua>) в 2019 г. запланировала в створе навигационного канала к порту г. Бердянска работы по выемке грунта объемом в 1,4 млн м³. В порту г. Мариуполя общий объем дноуглубления, необходимый для возвращения к паспортной осадке, составляет ~ 1,5 млн м³ [4]. Приведенные данные, хоть и косвенно, свидетельствуют о высокой подвижности донных отложений.

Отметим, что некоторые закономерности движения донных отложений в масштабах моря приведены в работах [5, 6], в которых указывается, что большая часть абразивного материала, образованного вследствие эрозии берегов Азовского моря, в виде взвешенных веществ транспортируется в глубоководную часть моря.

Таким образом, основная цель настоящей работы заключается в получении общей картины движения наносов в Азовском море за климатический отрезок времени с 1979 по 2020 г. Основным методом исследований – математическое моделирование.

Материалы и методы

Азовское море является относительно небольшим водоемом, относящимся к бассейну Атлантического океана (рис. 1). Площадь поверхности ~ 39 тыс. км². Характерные линейные размеры, составляющие условные длину и ширину, – 360 и 180 км соответственно; средняя глубина моря – 7,5 м, максимальная – 13,5 м². Дно центральной части моря представляет собой довольно плоскую равнину, покрытую мягким илом, глубины в этой части моря 10–12 м [7]. От обрывистого северного берега в юго-западном направлении отходят несколько песчаных кос (Белосарайская, Бердянская, Обиточная, Федотова). На западе берег представляет собой сплошную песчаную косу (Арабатская Стрелка) шириной от нескольких сотен метров на юге до 6–8 км на севере. Восточный берег образован песчаным баром с несколькими развитыми косами (Ачуевская, Ясенская, Камышеватская). На севере к основной акватории примыкает вытянутый в северо-восточном направлении мелководный Таганрогский залив.

Для Азовского моря характерен смешанный тип донных отложений³ с содержанием в близких пропорциях (25–40 %) фракций ила, алевролита и песка. Подобный тип осадков наиболее характерен для прибрежных участков, оснований крупных банок открытого моря, а также центров заливов.

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

³ Экологический атлас Азовского моря / Гл. ред. Г. Г. Матишов. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 325 с.



Р и с. 1. Батиметрическая карта и морфометрические особенности Азовского моря
F i g. 1. Bathymetry map and morphometric features of the Sea of Azov

Основными факторами, определяющими гидродинамический режим Азовского моря, являются морские течения, поверхностное волнение, сейшевые колебания уровня, а также штормовые нагоны. В условиях относительно мелководного и незначительного по размерам моря указанные гидродинамические факторы являются в высшей степени взаимосвязанными. Например, степень развития ветрового волнения определяется устойчивостью по направлению и силе ветрового потока, длиной разгона, глубиной места. В Азовском море высоты штормового повышения уровня могут быть сопоставимы с глубинами. В 1969 г. в результате сильнейшего шторма в районе Темрюка ⁴ наблюдался почти трехметровый нагон воды, а в Геническе – двухметровый сгон, общий перекося уровня между Геническом и Темрюком составил около 5 м.

Еще одной особенностью Азовского моря является формирование ледового поля, которое, в зависимости от суровости зим, может покрывать всю акваторию моря. Это явление существенным образом трансформирует поля течений и ветрового волнения.

Таким образом, очевиден комплексный характер формирования гидродинамического режима Азовского моря.

Корректное описание механизмов взаимодействия морских течений, ветрового волнения и штормовых нагонов возможно в рамках численного моделирования. В 2021 г. авторами настоящей статьи с привлечением трехмерной гидродинамической и спектральной волновой моделей получены климатические характеристики морских течений и поверхностного волнения на Азовском море за период с 1979 по 2020 г. [8]. Основные подходы, используемые при моделировании:

⁴ Шнюков Е. Ф., Митин Л. И., Цемко В. П. Катастрофы в Черном море. Киев : Манускрипт, 1994. 296 с.

1. Исходные поля атмосферного давления, компонентов приземного ветра и концентрации льда выбираются из базы данных глобального атмосферного реанализа *ERA5*, распространяемого Европейским центром среднесрочных прогнозов (*ECMWF*) (URL: <https://cds.climate.copernicus.eu>). Расчетная область ограничена координатами: по широте – 45,25°–47,50° с. ш., по долготе – 34,75°–39,50° в. д. Пространственное разрешение одинаково по широте и долготе и составляет 0,125°, шаг по времени – 3 ч для полей атмосферного давления и ветра, 1 сут – для концентрации льда. Основа расчетной сетки – батиметрическая карта Азовского моря, построенная специалистами Южного научного центра РАН [9].

2. В качестве гидродинамической модели выступает модель *ADCIRC* (*The ADvanced CIRCulation model*), основанная на решении уравнений мелкой воды с применением метода конечных элементов. Нами используется 5-слойный σ -координатный трехмерный вариант модели. *ADCIRC* позволяет контролировать процессы временного осушения (вследствие сгонов) или затопления (как результат нагонов) прилегающих прибрежных областей. Модель *ADCIRC* особенно хорошо себя зарекомендовала при исследованиях экстремальных штормовых нагонов [10]. В нашем случае выбор 5-слойной модели является определенным компромиссом между необходимостью учета основных физических механизмов генерации течений и ресурсоемкими вычислительными возможностями, что вполне оправданно, полагаем, для описания общего характера движения вод. Рассмотрение деталей вертикальной структуры течений требует несколько иного подхода и выходит за рамки настоящего исследования.

3. Параметры поверхностного волнения рассчитываются с помощью спектральной волновой модели *MIKE 21 SW* Датского гидравлического института, реализующей основные физические механизмы трансформации ветрового волнения. Вопросы адаптации модели к условиям Черного и Азовского морей детально изложены в работе [11].

4. Объединение моделей позволяет учитывать взаимодействие поверхностного волнения и течений. Определяемые в гидродинамической модели параметры течений и возвышение уровня используются в спектральной волновой модели при расчетах параметров поверхностного волнения. Радиационные напряжения, генерируемые процессами обрушения волн и рассчитываемые волновой моделью, корректируют морские течения (в основном прибрежные) и учитываются гидродинамической моделью.

Имея в распоряжении основные гидродинамические параметры, можно рассчитать потоки донного материала. Для этого воспользуемся предложенным Р. Соулсби подходом [12], учитывающим транспорт взвешенного и влекомого материала в условиях комбинированного воздействия течений и поверхностного волнения. Поток донных отложений описывается выражением

$$Q = A_s \bar{U} \left[\left(\bar{U}^2 + \frac{0,018}{c_D} U_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \bar{U}_{cr} \right]^{2,4} (1 - 1,6 \tan \beta), \quad (1)$$

где коэффициент $A_s = A_{sb} + A_{ss}$; $A_{sb} = \frac{0,005h \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{1,2}}{[(s-1)gd_{50}]^{1,2}}$; $A_{ss} = \frac{0,012d_{50}D_*^{-0,6}}{[(s-1)gd_{50}]^{1,2}}$; \bar{U} – скорость течения, м/с; U_{rms} – среднеквадратичная волновая орбитальная скорость, м/с;

$C_D = \left[\frac{0,40}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - 1} \right]^2$ – коэффициент трения; $\bar{U}_{cr} = 0,19(d_{50})^{0,1} \log_{10} \left(\frac{4h}{d_{90}} \right)$ – пороговое значение скорости течения, м/с; β – уклон дна; h – глубина, м; d_{50} и d_{90} – 50-й и 90-й процентиля распределений диаметров частиц, м; z_0 – шероховатость дна, м; s – относительная плотность осадков; g – ускорение свободного падения, м/с²; ν – кинематическая вязкость воды, м²/с; $D_* = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} d_{50}$. Согласно рекомендациям авторов, значение шероховатости принимается равным 0,006 м.

Таким образом, поток, задаваемый формулой (1), определяет объем частиц грунта (м³), перенесенных за единицу времени (с) через 1 м донной поверхности. Поскольку направление переноса вещества определяется в конечном итоге направлением результирующего течения, поток вещества в векторной форме представляется в виде

$$\mathbf{Q} = (Q_x, Q_y) = \left(|\mathbf{Q}| \frac{U_x}{|U|}, |\mathbf{Q}| \frac{U_y}{|U|} \right), \quad (2)$$

где Q_x, Q_y – компоненты потока донных отложений; $U = (U_x, U_y)$ – вектор скорости течения; U_x, U_y – компоненты скорости течения; $|\mathbf{Q}|, |U|$ – модули потока и скорости. Уточним, что преимуществом трехмерной гидродинамической модели является возможность использования именно придонных компонент скорости течения, ответственных за перемещение донного материала. Осредненные по вертикали параметры течений не учитывают, например, формирование противотечений в условиях сильных штормовых нагонов.

При моделировании используется пространственная карта донных отложений Азовского моря, опубликованная в информационной системе «Экологический атлас Азовского моря»⁵, а также в монографии [2]. Для области залегания грунтов, обозначенных в Атласе как «песок средне- мелкозернистый (фракция 1–0,1 мм составляет более 70 %)», а также «песок алеврито-илистый (фракция 1–0,1 мм – 50–70 %)», медианный диаметр частиц соответствует среднезернистому песку и равняется 0,35 мм; в смешанном типе осадков $d_{50} = 0,15$ мм (т. е. полагаем, что доминирует мелкозернистый песок); в областях с преобладанием алевритов $d_{50} = 0,075$ мм. Конечно, все это можно воспринимать как грубое приближение, но здесь сталкиваемся как с ограничениями модели (транспорт тех же илов требует несколько иного подхода), так и с качеством исходных данных. В любом случае полагаем, что дальнейшие возможные усовершенствования будут связаны скорее с уточнениями, но не с коренным пересмотром предлагаемой схемы.

Для расчетов потоков по формуле (1) требуются данные о распределении еще одного размера частиц, соответствующего 90 % функции распределения диаметров частиц (d_{90}). К сожалению, необходимая информация о функциях распределений диаметров частиц (не говоря уже об их пространственной

⁵ АИС «Экологический атлас Азовского моря» / Гл. ред. Г. Г. Матишов. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 325 с. URL: <http://atlas.iaz.ssc-ras.ru/sitemap-ecoatlas.html> (дата обращения: 16.05.2022).

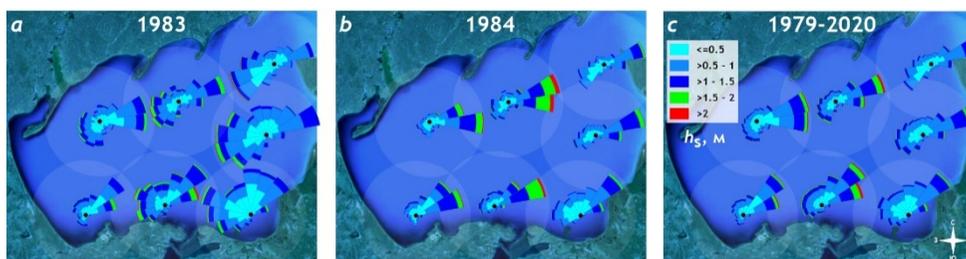
изменчивости) отсутствует. По этой причине ограничимся оценочными величинами. Следуя работе [13], в которой анализируется гранулометрический состав донных отложений Азовского моря, а также собственным исследованиям на косе Долгой, принимаем, что размер d_{90} в два – четыре раза превосходит медианный размер d_{50} . Исходя из этого, оценочно будем полагать, что $d_{90} = 3d_{50}$.

Необходимые расчеты произведены за 42 года – с 1979 по 2020 г. Выходной массив данных состоит из ежечасных пространственных полей скоростей и направлений течений на пяти σ -горизонтах, интегральных характеристик ветрового волнения (высот, периодов, направлений распространений), уровней моря, а также потоков донных осадков. Общая длина массива позволяет детально анализировать отдельные гидродинамические ситуации, сезонные особенности, а также производить климатические обобщения.

Результаты и обсуждение

В мелководном и ограниченном по размерам Азовском море характер гидродинамического режима определяют господствующие ветры. При этом, естественно, ощутимо влияние местных условий, таких как ориентация береговой линии, батиметрические особенности, сток рек, возможное ледовое покрытие. В целом над акваторией моря преобладают северо-восточные и восточные ветры с суммарной повторяемостью до 45 % [7], что обуславливает картину среднегодовых (климатических) полей гидродинамических параметров. Тем не менее в отдельные годы наблюдается повышенная повторяемость ветров других секторов, в частности юго-западных, другими словами, подобное доминирование не является безусловным. По этой причине не лишено интереса рассмотрение не только климатических, но и некоторых среднегодовых полей.

На рис. 2 приведены розы ветрового волнения (в терминах значительных высот волн) для нескольких точек акватории Азовского моря, учитывающие только 1983 г. с увеличенной повторяемостью юго-западных ветров (рис. 2, *a*); только 1984 г. со значительным преобладанием северо-восточных ветров (рис. 2, *b*); весь период с 1979 по 2020 г. (рис. 2, *c*).



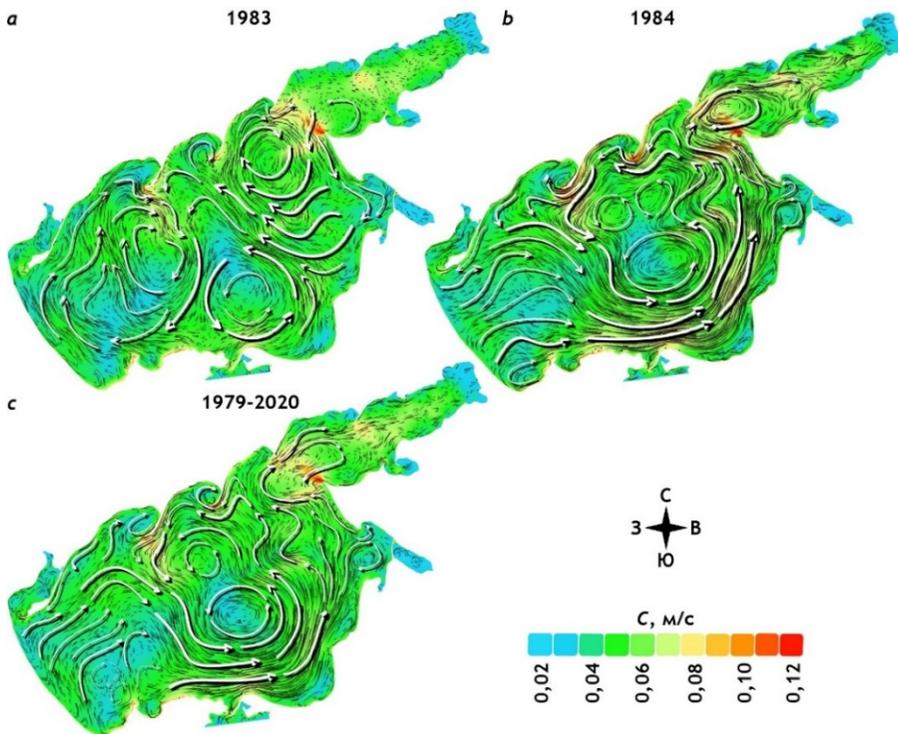
Р и с. 2. Розы ветрового волнения, м, за 1983 (*a*), 1984 (*b*), 1979–2020 гг. (*c*)

Fig. 2. Wind wave roses, m, for 1983 (*a*), 1984 (*b*) and 1979–2020 (*c*)

Как следует из рис. 2, в климатическом смысле почти для всей акватории моря северо-восточные направления волнения являются преобладающими.

Вклад юго-западных штормов наиболее ощутим в восточной части, что определяется в первую очередь максимальными возможными длинами разгона волн. Экстремальное волнение со значительными высотами волн, превышающими 2 м, также связано в основном, с ветрами северо-восточного направления и наблюдается в центральной части моря. Повышенная повторяемость волнения северо-восточных румбов является следствием устойчивости и продолжительности действия воздушных потоков этих направлений. Как правило, северо-восточный ветер связан с действием обширного азорского антициклона, охватывающего всю европейскую часть и определяющего ветровые условия продолжительное время.

Еще раз отметим, что особенностью Азовского моря является мелководность и относительно небольшие размеры. Следствием этого является быстрая реакция на смену атмосферных условий, а именно направления и силы преобладающего ветра, а также его пространственной изменчивости. Кроме того, значительные перекосы уровня, вызванные сгонно-нагонными явлениями, способствуют развитию циркуляции в вертикальной плоскости и могут приводить, например, к противотечениям в прибрежной зоне. Применение трехмерной гидродинамической модели позволяет анализировать важные с точки зрения динамики донных осадков придонные течения. На рис. 3 представлены карты придонных течений, осредненных за 1983 г. (рис. 3, *a*), 1984 г. (рис. 3, *b*) и за весь период с 1979 по 2020 г. (рис. 3, *c*).



Р и с. 3. Поля придонных течений Азовского моря, осредненных за 1983 (*a*), 1984 (*b*), 1979–2020 гг. (*c*)

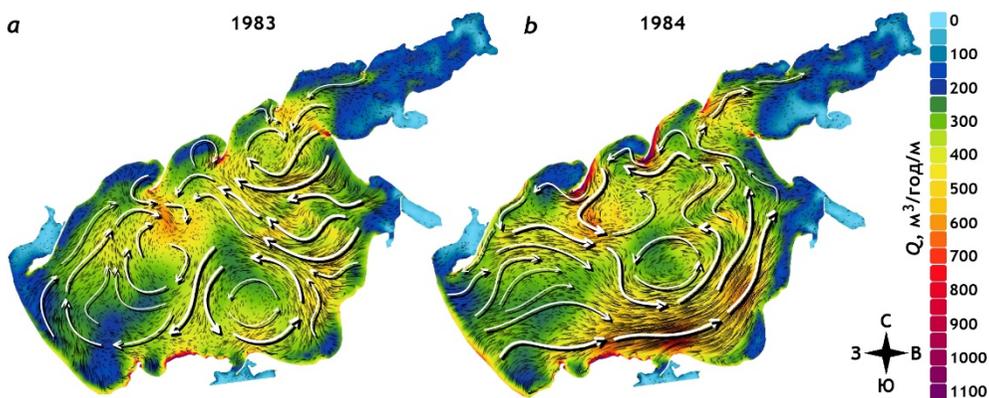
Fig. 3. Fields of the Azov Sea bottom currents averaged over 1983 (*a*), 1984 (*b*) and 1979–2020 (*c*)

Данные рис. 3 показывают, что доминирование ветров северо-восточного направления (рис. 3, *b*) способствует усилению придонных течений в прибрежных зонах северной, южной и восточной частей моря, другими словами, почти по всему периметру. В центральной части моря образуется обширный циклон. В западной части моря в придонном слое наблюдается отток вод от Арабатской Стрелки в сторону открытого моря, вызванный нагонными волнами. При усилении влияния юго-западных штормов (рис. 3, *a*) подобная картина придонных противотечений обнаруживается у восточного берега. Кроме того, ветры юго-западных секторов формируют антициклонический круговорот, охватывающий всю западную часть моря, и несколько ослабляют циклоническое образование в центре моря.

Выделим основные особенности климатической придонной циркуляции вод в Азовском море (рис. 3, *c*):

- в центральной части моря доминирует обширный циклонический круговорот;
- в западной части формируется слабо развитый антициклон; генеральный перенос вод направлен от Арабатской Стрелки в сторону открытого моря;
- наибольшие скорости вдольбереговых течений наблюдаются в северной части моря в районе Бердянской и Обиточной кос, а также в проливе между основной частью моря и Таганрогским заливом.

Имея в распоряжении массив необходимых параметров придонных течений и ветрового волнения, можно перейти к оценкам потоков донного материала на акватории Азовского моря. На рис. 4 приведены среднегодовые пространственные поля потоков донных отложений за 1983 (рис. 4, *a*) и 1984 гг. (рис. 4, *b*).



Р и с. 4. Среднегодовые потоки донного материала, $\text{м}^3/\text{год}/\text{м}$, за 1983 (*a*) и 1984 гг. (*b*)
F i g. 4. Annual average fluxes of bottom sediments, $\text{m}^3/\text{year}/\text{m}$, for 1983 (*a*) and 1984 (*b*)

Как следует из рис. 4, существует одна характерная особенность глобального (в масштабах всего моря) транспорта наносов, независимая от преобладания тех или иных атмосферных условий. Речь идет о циклоническом типе движений, характерных для центральной части моря. Доминирование ветров северо-восточных или юго-западных направлений вызывает преобладающий

транспорт донных осадков в сторону открытого моря от соответственно западного (рис. 4, *b*) или восточного (рис. 4, *a*) побережий.

Климатические (как результат обобщения данных за период с 1979 по 2020 г.) потоки донного материала приведены на рис. 5.

Данные рис. 5 демонстрируют климатические черты транспорта донных отложений в Азовском море:

- основной поток формируется в виде обширного циклона, охватывающего центральную часть моря, с двумя наиболее вероятными центрами круговорота;

- в этот круговорот вовлекаются донные осадки из западной и восточной прибрежных частей моря;

- на северном побережье, в районе оконечности Обиточной косы, встречаются два потока: один, преобладающий, со стороны Бердянской косы, второй, менее выраженный, со стороны косы Федотова. Результирующий поток образует обширные отмели к югу от Обиточной косы;

- вдоль Арабатской Стрелки доминирует поперечный перенос в сторону моря, чем, вполне допустимо, и объясняется ее относительная устойчивость. Подобная картина наблюдается на протяженном участке восточного побережья, между косами Долгой и Камышеватской, а также к югу от Ачуевской косы;

- наиболее сильные потоки наносов формируются у Бердянской у Обиточной кос, а также в районе косы Долгой.

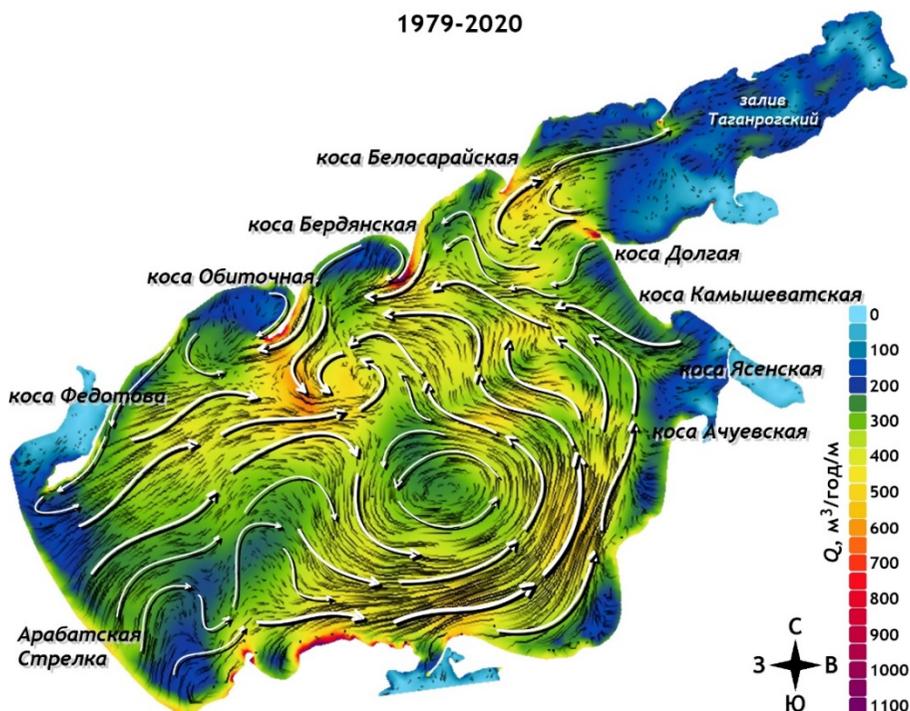


Рис. 5. Климатические потоки донных осадков ($\text{м}^3/\text{год}/\text{м}$)

Fig. 5. Climatic fluxes of bottom sediments ($\text{m}^3/\text{year}/\text{m}$)

Отметим, что при анализе результатов мы сознательно не касаемся количественных оценок величин потоков (хотя они и приведены на иллюстрациях) по нескольким причинам. Во-первых, критически важным при моделировании является корректное задание исходных данных, в нашем случае – карт донных отложений. Пески и алевриты, учитываемые в модели, для разных участков моря обладают разным процентным содержанием других пород, илов или ракушки, что неминуемо сказывается на их способности к транспортировке. Учет всех этих моментов – задача нетривиальная. Во-вторых, используемый нами подход к моделированию потоков – только один из возможных, со своими ограничениями и допущениями. Ну и наконец, последнее: любые модельные расчеты необходимо подкреплять данными наблюдений, которые в нашем случае практически отсутствуют. Конечно, можно воспользоваться косвенными критериями, например скоростью осадконакопления, но и в этом случае, учитывая точность метода, будем иметь дело разве что с порядками величин. Таким образом, мы вполне уверены в полученной нами **качественной** картине транспорта донных осадков и понимаем дискуссионность **количественных** оценок.

Заключение

Основная цель работы заключалась в получении общей картины движения наносов в Азовском море за климатический отрезок времени. Исследования проведены методами численного моделирования с использованием современных гидродинамической и волновой моделей, а также модели транспорта наносов, учитывающей комбинированное воздействие морских течений и ветрового волнения.

Выполнены расчеты гидродинамических параметров Азовского моря за 42 года – с 1979 по 2020 г. Выходной массив данных состоит из ежечасных пространственных полей скоростей и направлений течений на пяти σ -горизонтах, интегральных характеристик ветрового волнения (высота, период, направление распространения), уровней моря, а также потоков донного вещества. Общая длина массива позволяет детально анализировать отдельные гидродинамические ситуации, сезонные особенности, а также производить климатические обобщения.

Основные результаты:

Почти для всей акватории моря северо-восточные направления волнения являются преобладающими. Экстремальное волнение со значительными высотами волн, превышающими 2 м, также связано в основном с северо-восточными секторами волнения и наблюдается в центральной части моря.

Основные особенности климатической придонной циркуляции вод:

- 1) в центральной части моря доминирует обширный циклонический круговорот;
- 2) в западной части формируется слаборазвитый антициклон;
- 3) наибольшие скорости вдольбереговых течений наблюдаются в северной части моря в районе Бердянской и Обиточной кос, а также в проливе между основной частью моря и Таганрогским заливом.

Климатические черты транспорта донных отложений в Азовском море:

- 1) основной поток формируется в виде обширного циклона, охватывающего центральную часть моря, в который вовлекаются донные осадки с западной и восточной прибрежных частей моря;

2) на северном побережье, в районе оконечности Обиточной косы, встречаются два потока: один, преобладающий, со стороны Бердянской косы, второй, менее выраженный, со стороны косы Федотова. Результирующий поток образует обширные отмели к югу от Обиточной косы;

3) наиболее сильные потоки формируются у Бердянской у Обиточной косы, а также в районе косы Долгой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матишов Г. Г.* Сейсмопрофилирование и картирование новейших отложений дна Азовского моря // Вестник Южного научного центра РАН. 2007. Т. 3, № 3. С. 32–40.
2. *Ивлиева О. В.* Особенности осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2009. 319 с.
3. Новые данные об осадконакоплении и биостратиграфии древне- и новоазовских отложений (Азовское море) / Г. Г. Матишов [и др.] // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467, № 4. С. 463–467. doi:10.7868/S0869565216100194
4. *Берлинский Н. А., Сагайдак М. А.* Оценка основных факторов заиления подходного канала порта Азовсталь (г. Мариуполь, Украина) // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія». 2019. Вип. 20. Р. 87–96. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-20-08>
5. *Kosyan R. D., Krylenko M. V.* Modern state and dynamics of the Sea of Azov coasts // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2019. Vol. 224. P. 314–323. doi:10.1016/j.ecss.2019.05.008
6. Динамика радиационного фона в российских морях (новые данные по Азовскому морю) / Г. Г. Матишов [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493, № 2. С. 83–87. doi:10.31857/S2686739720080125
7. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 3. Азовское море. Л. : Гидрометеоздат, 1986. 218 с.
8. *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. doi:10.31857/S2686739721090085
9. *Матишов Г. Г.* Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря // Вестник Южного научного центра РАН. 2006. Т. 2, № 1. С. 44–48.
10. *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. Севастополь, 2013. Вып. 27. С. 139–145.
11. *Divinsky B., Kosyan R.* Parameters of wind seas and swell in the Black Sea based on numerical modeling // Oceanologia. 2018. Vol. 60, iss. 3. P. 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.11.006>
12. *Soulsby R.* Dynamics of marine sands: A manual for practical applications. London : Thomas Telford, 1997. 249 p.
13. *Баскакова Т. Е., Дмитриенко В. М.* Гранулометрический состав донных отложений Азовского моря // Труды АзНИИРХ. Ростов-на-Дону : АзНИИРХ, 2017. Т. 1. С. 9–15. URL: <https://aquadocs.org/handle/1834/16790> (дата обращения: 14.05.2022).

Об авторах:

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, **ORCID ID: 0000-0002-2452-1922, ResearcherID: C-7262-2014**, divin@ocean.ru

Косьян Рубен Дереникович, заведующий лабораторией геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: C-5154-2014**, rkosyan@hotmail.com