

Научная статья

УДК 551.46.08+551.46 (26)
EDN: IOEERJ

Распространение черноморских вод в акватории Азовского моря по спутниковым данным и модели *NEMO*

Н. В. Василенко [✉], А. А. Алескерова, А. А. Кубряков, А. И. Мизюк,
С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
[✉] Nadinkot.nk@gmail.com

Поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 06.02.2023;
принята к публикации 26.04.2023.

Аннотация

Цель. Исследованы динамика, особенности сезонной изменчивости и причины затоков черноморских вод в акваторию Азовского моря.

Методы и результаты. Использовались спутниковые данные среднего и высокого разрешения, а также результаты численного моделирования поля солёности Азово-Черноморского бассейна по модели *NEMO* с высоким разрешением (1 км) за 2008–2009 гг. Проведенный анализ показал, что наиболее часто прозрачные солёные черноморские воды фиксировались в южной и юго-восточной частях Азовского моря в холодное время года. По спутниковым измерениям, максимальное количество затоков наблюдалось в ноябре и в марте, а минимальное – с июня по октябрь. Аналогичные результаты получены по данным численных расчетов за 2008–2009 гг.: в зимний период интенсивные затоки солёных вод в Азовское море (с потоком более 20 т/с) наблюдаются в трети случаев, оцененный поток соли в отдельных случаях составляет 60 т/с, в летний же период количество затоков близко к нулю. Черноморские воды далее преимущественно движутся в циклоническом направлении, иногда достигая центра бассейна. Высокие градиенты плотности в ряде случаев вызывают развитие интенсивного циклонического вихря у пролива на фронте затоков черноморских вод. На основе данных моделирования оценена связь ветра и потоков соли в Азовское море. Показано, что эта связь носит кубический характер, что частично объясняется ростом солёности поступающих вод, вызванным усилением вертикального перемешивания при действии штормов.

Выводы. Основными гидродинамическими причинами затоков черноморских вод и их сезонной изменчивости выступают: 1) интенсивный ветровой перенос во время ветров южных румбов; 2) фронтальные течения на границе апвеллингов у Керченского полуострова при действии западных и юго-западных ветров; 3) направленные на север течения на периферии проходящих синоптических вихрей.

Ключевые слова: Азовское море, Черное море, водообмен, Керченский пролив, *MODIS*, *NEMO*, скорость течения, вихревая динамика, сезонная динамика, спутниковые данные, циркуляция вод, численное моделирование, транспорт воды, солёность, температура поверхности моря, концентрация хлорофилла, дрейфовые течения, поток соли, гидрооптические характеристики

Благодарности: анализ скорости течений и их связи с вихревой динамикой выполнен при поддержке гранта РФФ 21-77-10052. Исследование изменчивости затоков черноморских вод по спутниковым данным выполнено в рамках темы госзадания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2021-0006.

© Василенко Н. В., Алескерова А. А., Кубряков А. А., Мизюк А. И., Станичный С. В., 2023

Для цитирования: Распространение черноморских вод в акватории Азовского моря по спутниковым данным и модели *NEMO* / Н. В. Василенко [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 4. С. 528–552. EDN IOEERJ.

Original article

Propagation of the Black Sea Waters in the Sea of Azov Based on the Satellite Data and the *NEMO* Model

N. V. Vasilenko ✉, A. A. Aleskerova, A. A. Kubryakov, A. I. Mizyuk, S. V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ Nadinkot.nk@gmail.com

Abstract

Purpose. The paper is purposed at studying the dynamics and reasons of the Black Sea water inflows to the Sea of Azov, as well as the features of their seasonal variability.

Methods and Results. Medium and high resolution satellite data, and also the results of numerical modeling the salinity field of the Azov-Black Sea basin for 2008–2009 by the high resolution (1 km) *NEMO* model were used. The analysis showed that the transparent and salty Black Sea waters were recorded most frequently in the southern and southeastern parts of the Azov Sea during a cold season. Based on the satellite measurements, the maximum number of inflows was observed in November and March, and the minimum one – from June to October. Similar results were obtained from the data of numerical calculations for 2008–2009: in winter, intense salt water inflows to the Sea of Azov (the flow exceeds 20 tons/s) are observed in a third of cases, and in some cases, the estimated salt flux attains 60 tons/s, whereas in summer their number is close to zero. Further the Black Sea waters move predominantly in a cyclonic direction, sometimes reaching the basin center. In some cases, high density gradients induce the development of an intense cyclonic eddy near the strait at the front of the Black Sea water inflows. The simulation data made it possible to assess the relationship between the wind and the salt fluxes to the Sea of Azov. It is shown that this relationship is of a cubic nature that is partly explained by increase of the inflowing water salinity caused by the intensified vertical mixing during the storms.

Conclusions. The main hydrodynamic reasons for the Black Sea water inflows to the Sea of Azov and their seasonal variability are the following: 1) intense wind transfer during the south winds; 2) frontal currents at the boundary of upwellings near the Kerch Peninsula during the western and southwestern winds; 3) orbital currents of the passing anticyclones which are able to induce a northerly water transport in the strait at any wind conditions.

Keywords: Sea of Azov, Black Sea, water exchange, Kerch Strait, *MODIS*, *NEMO*, current velocity, eddy dynamics, seasonal dynamics, satellite data, water circulation, numerical modeling, water transport, salinity, sea surface temperature, chlorophyll concentration, drift currents, salt flux, hydrooptical characteristics

Acknowledgments: Analysis of the current velocities and their relation to eddy dynamics was supported by the RSF grant 21-77-10052. Study of the variability of the Black Sea water inflows using the satellite data was carried out within the framework of the theme of state assignment FNNN-2021-0006.

For citation: Vasilenko, N.V., Aleskerova, A.A., Kubryakov, A.A., Mizyuk, A.I. and Stanichny, S.V., 2023. Propagation of the Black Sea Waters in the Sea of Azov Based on the Satellite Data and the *NEMO* Model. *Physical Oceanography*, 30(4), pp. 484-507.

1. Введение

Азовское море является мелководной акваторией внутреннего типа (средняя глубина 7 м, максимальная – 14,4 м), для которой характерно интенсивное

перемешивание, высокие концентрации взвешенного вещества в водах и выраженное влияние речного пресноводного стока [1–3]. Последние годы отмечается рост среднего значения солености вод акватории (около 14) [4–7]. Азовское море характеризуется также высокой биопродуктивностью и биоразнообразием, является одним из важнейших источников биологических ресурсов.

Воды Азовского и Черного морей существенно различаются по целому ряду термохалинных и гидрооптических характеристик [3, 8]. Интенсивный речной сток в Азовском море приводит к значительному опреснению бассейна и является важным источником биогенных элементов, вызывающих рост биопродуктивности бассейна. Ежегодно в теплый период года наблюдается значительный рост концентрации хлорофилла *a*, которая в отдельных районах может достигать 50 мг/м³ [9]. Мелководное Азовское море характеризуется низкой прозрачностью, что в первую очередь связано с взмучиванием придонной взвеси под действием сильных и умеренных ветров. Из-за малых глубин в холодный период года конвекция в Азовском море проникает до дна и его температура становится значительно ниже, чем температура Черного моря. Эти характеристики позволяют эффективно идентифицировать затоки вод Черного моря по спутниковым данным в оптическом и инфракрасном диапазоне [10]. В исследовании [11] была разработана конфигурация модели циркуляции *NEMO* для Азово-Черноморского региона с высоким разрешением (1,2 км), которая позволяет явно воспроизводить водообмен через Керченский пролив, анализировать распространение соленых черноморских вод и их связь с режимом течений.

Затоки соленых менее продуктивных и относительно прозрачных вод Черного моря оказывают существенное влияние на термохалинную структуру вод, гидрохимический и гидробиологический режим Азовского моря [1, 2, 12]. По осредненным за многолетний период данным¹, сток воды из Азовского моря в Черное составляет 49,2 км³, а из Черного в Азовское –33,8 км³ в год. Интенсивность водообмена с Черным морем определяется морфологическими особенностями Керченского пролива, а также режимом течений и колебаний уровня поверхности моря [1]. Факторы, определяющие водообмен в Керченском проливе, значительно зависят от атмосферной циркуляции и компонентов водного баланса [13, 14]: формирование течений в Керченском проливе в некоторой степени связано с влиянием речного стока, но преимущественно зависит от характеристик ветра [15–17].

Особенности распространения черноморских вод в Азовское море описаны в работах [1, 2, 13–15, 17, 18], в которых представлены количественные оценки водообмена через Керченский пролив на основе данных натурных наблюдений и результатов численного моделирования, а также рассмотрено влияние различных гидрологических условий на возникновение черноморских затоков. Течения в Керченском проливе рассматривались также в работах [13, 19–20] на основе комплексного спутникового мониторинга. В частности, отмечено, что использование спутниковых изображений *MODIS-Aqua*, содержащих информацию о температуре морской поверхности, концентрации хлорофилла *a* и нормализованной яркости восходящего излучения на длине волны

¹ Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. Москва : Изд-во МГУ, 1982. 192 с.

551 нм, позволяет выявлять перенос черноморских и азовоморских вод через пролив. В работах [1, 14, 16, 20] показано, что затоки черноморских вод наблюдались в южной и юго-восточной частях Азовского моря.

Цель настоящей работы – исследование динамики причин затоков черноморских вод в акваторию Азовского моря и особенности их сезонной изменчивости. Впервые на основе долговременных спутниковых оптических измерений среднего и высокого разрешения, а также результатов численных расчетов проведен анализ временной и сезонной изменчивости затоков черноморских вод в Азовское море. По данным моделирования исследована связь этих затоков с характеристиками ветра и особенностями черноморских течений. На основе спутниковых и численных данных обозначены ареалы распространения черноморских вод в Азовском море.

2. Данные

2.1. Спутниковые данные

Существенная разница в гидрооптических характеристиках Черного и Азовского морей позволяет эффективно исследовать распространение вод Черного моря в акваторию Азовского моря по данным дистанционного зондирования. Для выявления распространения черноморских вод с меньшими концентрациями взвешенного вещества рассматривались ежесуточные спутниковые данные *MODIS-Aqua*, *MODIS-Terra* о яркости восходящего излучения на длине волны 551 нм за 2003–2020 гг. Использовались также данные *MODIS* о концентрации хлорофилла *a* и температуре поверхностного слоя моря (ТПМ). Данные были получены из архива *Ocean Color* (URL: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

Для детального рассмотрения особенностей черноморских затоков использовались спутниковые данные высокого пространственного разрешения *OLI (Operational Land Imager) Landsat-7, -8*, *MSI (MultiSpectral Instrument) Sentinel-2* (30 и 10 м соответственно). Данные были получены на портале *USGS* (URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Для анализа влияния ветровых условий на формирование затоков вод Черного моря в Азовское использовались данные глобального атмосферного реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*ECMWF*) последнего поколения *ERA5* с пространственным разрешением $0,25^\circ$ и дискретностью 1 ч.

2.2. Численное моделирование

Для исследования затоков черноморских вод по данным численного моделирования используются результаты, полученные на основе модельного комплекса *NEMO* [11, 21]. Расчетный домен конфигурации охватывает бассейн Азовского, Черного и Мраморного морей (так называемый Эвксинский каскад) с почти однородным пространственным разрешением $\approx 1,2$ км.

Более подробное описание используемой конфигурации представлено в [11]. Отметим ряд допущений в данной работе при проведении численного эксперимента. Дискретизация по вертикали выполнялась с использованием *z*-координаты с дробным шагом на 35 горизонтах таким образом, чтобы в наиболее глубокой части Азовского моря было 5 горизонтов, а в наиболее

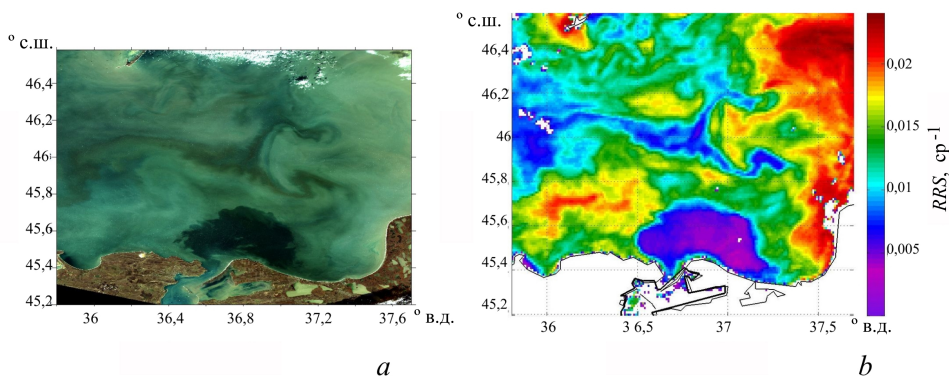
мелкой части Керченского пролива – минимум 3 горизонта. В связи с этим показатели водообмена между бассейнами по результатам численного моделирования являются несколько завышенными.

Стоит отметить, что в данной модели отсутствует ледяной покров, который регулярно формируется в акватории Азовского моря в зимний период. Учет льда проводился только посредством коррекции потока тепла в области, в которой расчетная температура поверхности моря становится ниже температуры замерзания воды, но без коррекции коэффициента динамического сопротивления, необходимого для определения напряжения трения ветра. Это влияет на результаты анализа динамики вод моря главным образом в зимний период. Исследования ² показали, 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 был свободен ото льда.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Затоки черноморских вод в Азовское море по спутниковым данным

При рассмотрении спутниковых данных высокого разрешения *Landsat-7*, *-8*, *Sentinel-2* в южной и юго-восточной частях Азовского моря к северу от Керченского пролива ежегодно наблюдаются зоны с более чистыми от взвешенного вещества водами Черного моря. Для примера представлен *RGB*-композит спутникового изображения *Landsat-8* от 13.11.2015 (рис. 1, *a*), на котором с помощью визуальной оценки можно отличить обширную область чистых черноморских вод от более мутных окружающих вод Азовского моря. Представленный черноморский заток имеет площадь проявления на поверхности 1165 км² и достигает широты 45,72° с. ш.



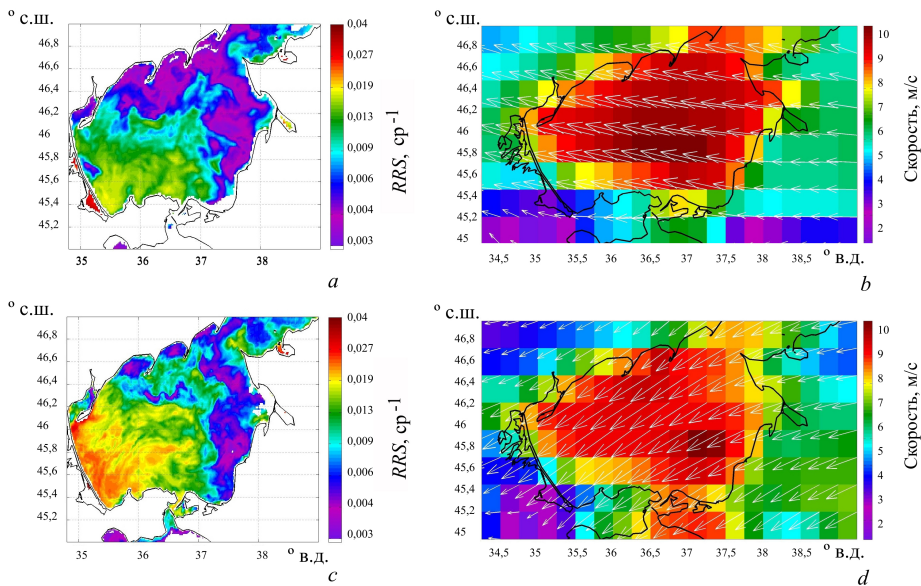
Р и с. 1. Пример распространения чистых от взвешенного вещества черноморских вод в южной части Азовского моря: *a* – данные *Landsat-8* от 13.11.2015, *RGB*-композит в псевдонатуральных цветах; *b* – данные *MODIS-Aqua* о яркости восходящего излучения на длине волны 551 нм от 12.11.2015

F i g. 1. Example of propagation of the Black Sea waters free of suspended matter in the southern part of the Sea of Azov: *a* – the *Landsat-8* data on 13.11.2015, *RGB*-composite in pseudo-natural colors; *b* – the *MODIS-Aqua* data on the remote sensing reflectance at the wavelength 551 nm, 12.11. 2015

² Атлас льдов Черного и Азовского морей / Н. Н. Дьяков [и др.]. Севастополь, 2015. 219 с.

Для сравнения на рис. 1, *b* приведена карта яркости восходящего излучения (*RRS*) *MODIS-Aqua* на длине волны 551 нм (*RRS(551)*), которая характеризует количество рассеивающей взвеси в водах. Хорошо видно, что области чистых вод совпадают по данным спутников высокого и среднего разрешения. В области залива к северу от Керченского пролива *RRS(551)* в четыре раза ниже, чем в окружающих азовских водах. Отметим, что Азовское море характеризуется резкой изменчивостью биооптических характеристик, которая связана с быстрыми изменениями ветра и его влиянием на взмучивание придонной взвеси и эрозию берегов. Авторы считали, что на спутниковых данных наблюдается заток черноморских вод в случае обнаружения области со значительно более низкой величиной *RRS(551)* к северу от пролива и резких градиентов этого параметра. Выделение событий заток проводилось на основе визуального анализа каждой карты яркости ежедневного массива данных за 2003–2020 гг.

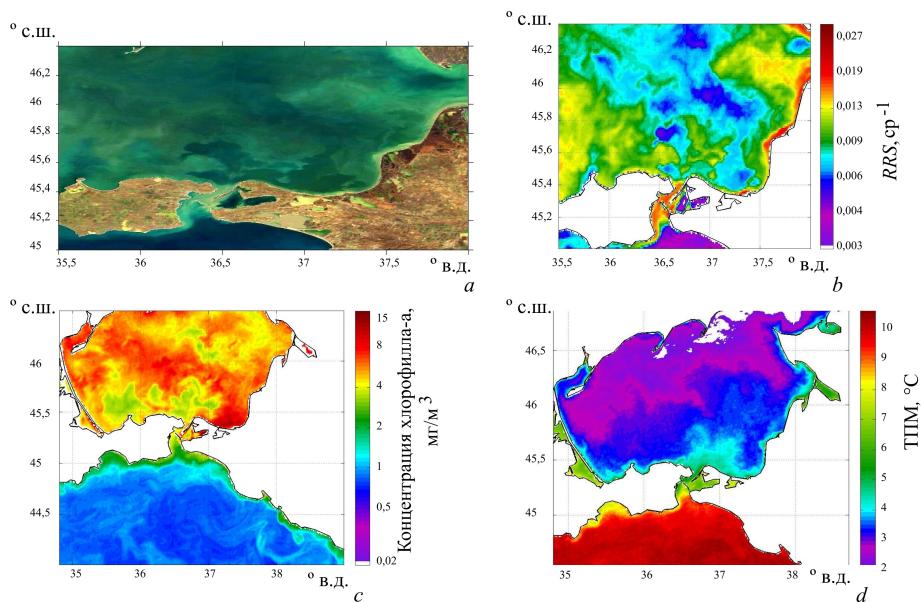
Однако привлечение только данных о яркости восходящего излучения в ряде случаев приводит к ошибкам. Пример таких неоднозначных карт яркости приведен на рис. 2, *a, c*. Хорошо видно, что в юго-восточной части Азовского моря наблюдаются относительно прозрачные воды с яркостью в 10 раз ниже яркости вод центральной части моря. Поскольку черноморские воды часто движутся на восток после их вхождения в Азовское море, такое распределение можно ошибочно принять за событие затока.



Р и с. 2. Поле яркости восходящего излучения на длине волны 551 нм при воздействии интенсивных ветров северо-восточного и восточного направлений: данные *MODIS-Aqua* о *RRS(551)* от 11.10.2018 (*a*) и 17.10.2018 (*c*); данные о полях ветра *ERA-5* от 07.10.2018 (*b*) и 16.10.2018 (*d*)
Fig. 2. Field of the remote sensing reflectance at the wavelength 551 nm at the intense northeast and eastern winds: the *MODIS-Aqua* *RRS(551)* data on 11.10.2018 (*a*) and 17.10.2018 (*c*); the *ERA-5* data on the wind fields on 07.10.2018 (*b*) and 16.10.2018 (*d*)

Однако детальный анализ таких карт показал, что подобное распределение яркости имеет особенности, которые, по-видимому, связаны с процессами взмучивания придонных осадков. На наветренной стороне моря скорость ветра меньше (рис. 2, *b, d*), и, кроме того, волны молодые и их длины относительно малы. В результате в восточной прибрежной части моря воды относительно прозрачны. Эти чистые воды переносятся от берега под действием ветра и занимают полосу шириной до 50 км у берега. В то же время в центральной и юго-западных частях моря развитые волны достигают дна и здесь наблюдается резкое взмучивание придонных осадков. Этот процесс формирует характерные горизонтальные неоднородности поля яркости вод, которые не связаны с затокком черноморских вод. При обнаружении характерной структуры поля яркости с увеличением значений на наветренной стороне во время и после действия северо-восточных, восточных ветров эти случаи были исключены из анализа.

Для более точной идентификации черноморских затоков привлекались дополнительные спутниковые измерения. В случае поступления черноморских вод в акваторию Азовского моря отмечается одновременно резкое снижение значений яркости восходящего излучения (разница от 0,003 и выше до 0,03 ср^{-1}) и снижение концентрации хлорофилла *a* (контраст достигает 2–10 мг/м^3). Например, подобную разницу в значениях можно наблюдать в случае черноморского затока на спутниковых изображениях от 18.02.2016 (рис. 3, *b, c*).

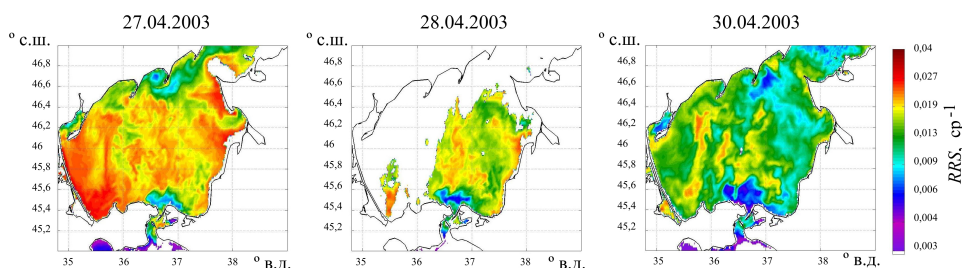


Р и с. 3. Ареал распространения черноморских затоков в юго-восточной части Азовского моря по данным *MODIS-Aqua* за 18.02.2016: *a* – *RGB*-композит в псевдонатуральных цветах; *b* – яркость восходящего излучения на длине волны 551 нм; *c* – концентрация хлорофилла *a*; *d* – ТПИМ

F i g. 3. Area of the Black Sea water inflows propagation in the southeastern part of the Sea of Azov based on the *MODIS-Aqua* data for 18.02.2016: *a* is the *RGB*-composite in pseudo-natural colors; *b* is the remote sensing reflectance at the wavelength 551 nm; *c* is the chlorophyll *a* concentration; *d* is SST

В холодный период года Азовское море охлаждается быстрее, чем Черное. Эти различия в температуре в некоторых случаях также позволяют выделить черноморские затоки в азовоморской акватории по данным о ТПМ. Так, на спутниковом изображении, содержащем информацию о ТПМ (рис. 3, *d*) можно наблюдать довольно существенную разницу значений для вод Азовского и Черного морей (до 9 °С). При этом в южной и юго-восточной частях Азовского моря, примыкающих к Керченскому проливу, температура поверхности значительно выше, чем в остальной акватории. Поскольку в данном районе также наблюдается зона с малым количеством взвешенного вещества (рис. 3, *a, b*) и низкой концентрацией хлорофилла *a* (рис. 3, *c*), повышенные значения температуры, вероятнее всего, связаны с поступлением более теплых вод Черного моря.

Продолжительность проявления черноморских затоков, по оптическим спутниковым данным, в среднем составляет от 1 до 3 дней, однако в некоторых случаях может наблюдаться в течение недели. На рис. 4 представлен пример динамики распространения черноморских вод на юге Азовского моря за 26.04.2003–30.04.2003. Так, 26–27 апреля после продолжительного периода облачного покрова над исследуемым районом в южной части азовоморской акватории фиксируется заток относительно чистых черноморских вод, которые соответствуют области низких значений яркости восходящего излучения. В последующие дни (28–30 апреля) эта область становится обширнее и продвигается севернее по акватории. В дальнейшем либо над исследуемым регионом наблюдался обширный облачный покров, либо проявление черноморских вод на поверхности не обнаруживалось.

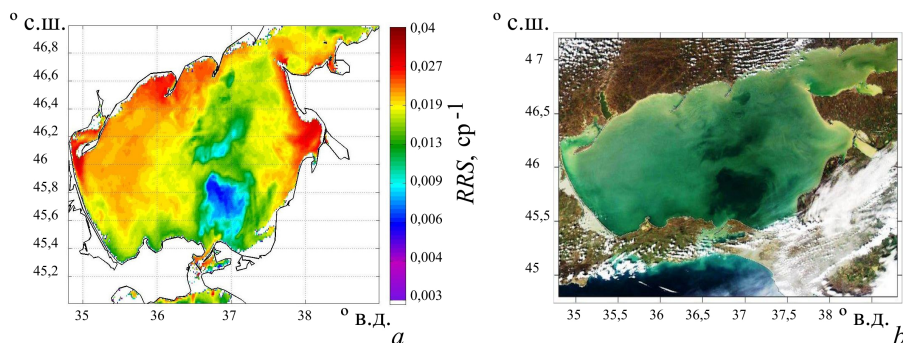


Р и с. 4. Динамика распространения черноморских вод на юге Азовского моря по данным *MODIS-Aqua* о яркости восходящего излучения на длине волны 551 нм

F i g. 4. Dynamics of the Black Sea water propagation in the south of the Sea of Azov based on the *MODIS-Aqua* data on the remote sensing reflectance at the wavelength 551 nm

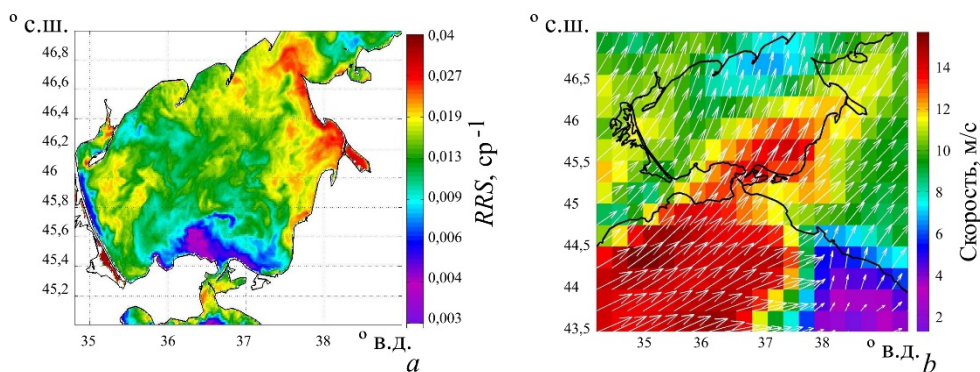
Как правило, по спутниковым данным, черноморские воды после транспорта через Керченский пролив наблюдаются в южной, юго-восточной и восточной частях Азовского моря. Площадь их проявления может достигать более 2000 км². При этом регулярно воды Черного моря по оптическим спутниковым изображениям проявляются на поверхности Азовского моря на расстоянии более 10 км к северу от Керченского пролива, как, например, в случае,

представленном на рис. 5, на котором черноморский заток проявляется на поверхности на расстоянии около 15 км от Керченского пролива в северном направлении.



Р и с. 5. Проявление обширного затока черноморских вод 20.03.2013 по данным *MODIS-Aqua* о яркости восходящего излучения на длине волны 551 нм (*a*); *RGB*-композит в псевдонатуральных цветах (*b*)

F i g. 5. Manifestation of extensive inflow of the Black Sea waters on 20.03.2013 based on the *MODIS-Aqua* data on the remote sensing reflectance at the wavelength 551 nm (*a*); *RGB*-composite in pseudo-natural colors (*b*)



Р и с. 6. Данные *MODIS-Aqua* о яркости восходящего излучения на длине волны 551 нм от 12.11.2016 (*a*); данные *NCEP* о полях ветра за 10.11.2016 (*b*)

F i g. 6. *MODIS-Aqua* data on the remote sensing reflectance at the wavelength 551 nm for 12.11.2016 (*a*); the *NCEP* wind field data for 10.11.2016 (*b*)

Оценка гидрометеорологических условий в исследуемом районе показала, что преобладающее влияние на возникновение затоков черноморских вод оказывает интенсивное ветровое воздействие. Наиболее часто затоки вод Черного моря обнаруживались на оптических спутниковых изображениях Азовского моря при продолжительном ветре южных направлений со скоростью более 6–8 м/с. На рис. 6, *a* представлен пример затока черноморских вод на изображении *MODIS-Aqua* за 12.11.2016, на котором в южной части акватории наблюдаются низкие значения яркости восходящего излучения до широты 45,7° с. ш.

При этом с 6 по 10 ноября фиксировался интенсивный южный ветер со скоростью до 10–11 м/с (рис. 6, *b*). Аналогично рассматривались ветровые условия для всех предполагаемых случаев переноса черноморских вод в Азовское море.

Однако в ряде случаев затоки черноморских вод наблюдались в отсутствие сильных ветров. Пример такого затока за 28 сентября 2008 г. представлен на рис. 7, *a*. Как показано в [22], значительное влияние на водообмен в проливе могут оказывать изменения уровня Черного моря, связанные с его крупно- и мезомасштабной динамикой. В зимний период усиление циклонической циркуляции Черного моря вызывает нагон у южной оконечности Керченского пролива, сопровождающийся уменьшением потока азовских вод в Черное море. По данным спутниковой альтиметрии (рис. 7, *b*) хорошо видно, что в это время вблизи пролива наблюдался выраженный рост уровня, который был связан с прохождением прибрежных антициклонических вихрей (округлые положительные аномалии на рис. 7, *b*). Как будет показано далее, такой процесс может являться одной из причин затоков черноморских вод.

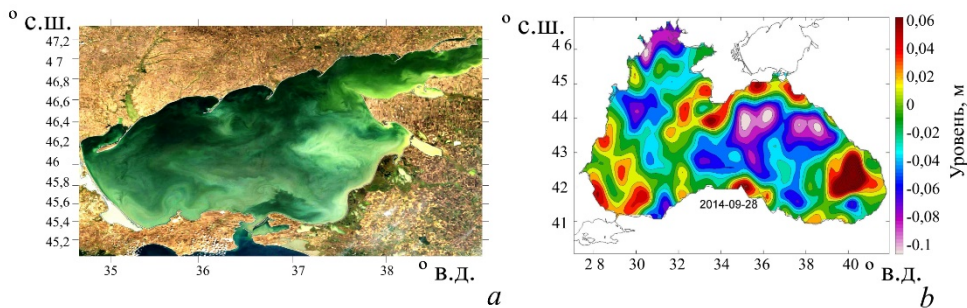


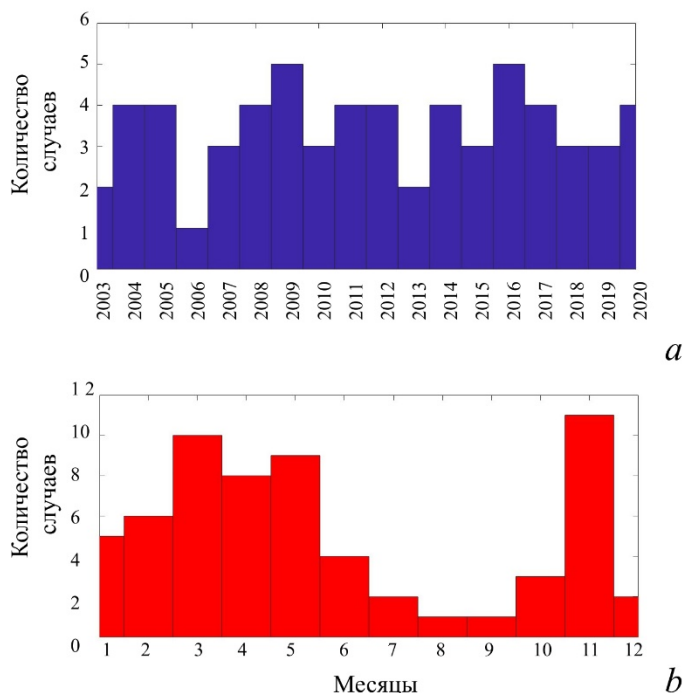
Рис. 7. RGB-композит в псевдонатуральных цветах за 28.09.2008 (*a*); данные спутниковой альтиметрии за 28.09.2008 (*b*)

Fig. 7. RGB-composite in pseudo-natural colors for 28.09.2008 (*a*); satellite altimetry data for 28.09.2008 (*b*)

По ежесуточным спутниковым данным за 2003–2020 гг., за исключением дней с облачным покровом, зафиксировано 62 случая черноморских затоков. Количество затоков относительно постоянно за весь период с незначительной тенденцией к росту. В среднем во все годы, за исключением 2006 и 2013 гг., по спутниковым данным, отмечается 3–4 явных случая распространения черноморских вод в Азовском море ежегодно (рис. 8, *a*).

Частота наблюдения затоков имеет значительную сезонную изменчивость (рис. 8, *b*). Наиболее часто за весь исследуемый период черноморские затоки фиксировались в холодное время года. Максимальное количество затоков наблюдалось в ноябре (11 случаев) и в марте (10 случаев). Меньше всего черноморские затоки возникали в период с июня по октябрь (до 4 случаев за весь исследовательский период). Отметим, что количество затоков определено по безоблачным спутниковым снимкам. Облачность над Черным морем имеет выраженный сезонный ход с максимумом в декабре – январе (80 %) и минимумом в июле – августе (40 %) [23]. Поэтому можно ожидать, что в зимний период

число затоков должно быть больше, чем было идентифицировано по спутниковым данным, и сезонный ход может быть еще более выражен.



Р и с. 8. Среднегодовое (а) и среднемесячное (b) количество выявленных случаев затоков черноморских вод в акватории Азовского моря по спутниковым данным за 2003–2020 гг.

F i g. 8. Average annual (a) and average monthly (b) numbers of the detected cases of the Black Sea water inflows to the Sea of Azov based on the satellite data for 2003–2020

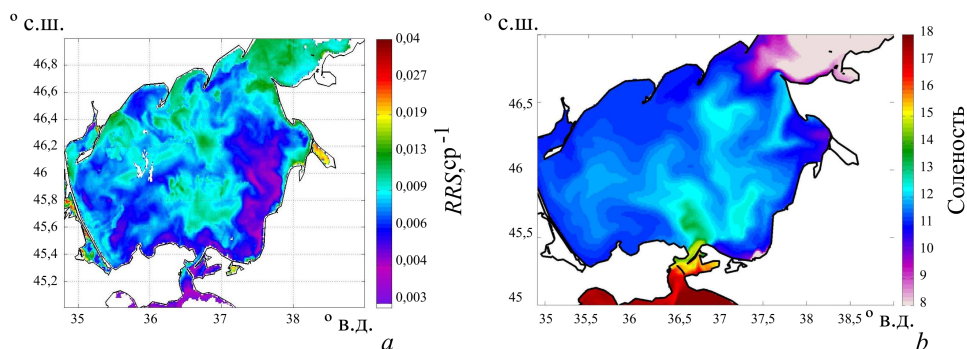
3.2. Затоки черноморских вод в Азовское море по результатам численного моделирования

Данные численного моделирования позволяют отчетливо наблюдать затоки черноморских вод и отслеживать их эволюцию в поле солености. Выявленные по модельным данным зоны более соленых черноморских вод в южной части Азовского моря соответствуют обнаруженным зонам низких значений яркости восходящего излучения по спутниковым данным *MODIS-Aqua*. При сопоставлении выявленных по спутниковым и модельным данным случаев затоков наблюдается четыре отчетливых совпадения в 2008 г. и пять – в 2009 г.

На рис. 9 представлен один из примеров такого сопоставления за 18 августа 2008 г. Так, на спутниковом изображении *MODIS-Aqua* в южной части акватории прослеживаются более чистые от взвешенного вещества воды. В эту же дату по расчетам модели *NEMO* отмечается аналогичный по местоположению ареал распространения более соленых вод Черного моря ($S > 12$).

Однако часть выявленных случаев (шесть за 2008–2009 гг.) черноморских затоков в Азовское море, полученных по данным численного моделирования,

по спутниковым данным не распознаются. Такие случаи, в частности, наблюдаются в мае – июне, когда оптические свойства вод Черного моря значительно меняются из-за интенсивного цветения кокколитофорид. Кроме этого, многие случаи затокков по модели *NEMO* приходятся на дни с развитым облачным покровом над районом исследования, что не позволяет сопоставить их со спутниковыми данными.



Р и с. 9. Сопоставление случая распространения вод Черного моря в южной части Азовского моря от 18.08.2008 по данным *MODIS-Aqua* о яркости восходящего излучения на длине волны 551 нм (а) и результатам расчета по модели *NEMO* о полях солености (б)

F i g. 9. Comparison of the case of the Black Sea water propagation in the southern part of the Sea of Azov on 18.08.2008 based on the *MODIS-Aqua* data on the remote sensing reflectance at the wavelength 551 nm (a) and the results of calculating the salinity fields using the *NEMO* model (b)

По расчетам модели *NEMO* в год предположительно выделяется более 20 случаев распространения более соленых черноморских вод в Азовском море (25 и 22 для 2008 и 2009 гг. соответственно). Продолжительность проявления затокков вод Черного моря, согласно расчетам модели, составляет от 1–2 до 5–7 сут. В согласии со спутниковой информацией, по модельным расчетам более соленые воды черноморского происхождения выделяются преимущественно в южной и юго-восточной частях Азовского моря. На рис. 10 представлен пример такого распространения черноморского затокка и увеличения его площади за 13.11.2008–29.11.2008. Так, по данным за 17.11.2008 (рис. 10, а), воды со значениями солености более 16 наблюдаются только южнее Керченского пролива. Далее на изображении от 21.11.2008 (рис. 10, б) наблюдается начальная стадия распространения черноморских вод с соленостью 16–18, которые распространяются на 10 км, образуя грибовидную структуру северной оконечности пролива. По полю скорости в это время хорошо виден достаточно интенсивный поток в проливе, направленный на север (рис. 11, а).

Данные моделирования, в согласии с работами [2, 22], показывают, что в большинстве случаев (90 %) причиной возникновения таких затокков являлись интенсивные юго-восточные и южные штормы. В данном примере интенсивное продвижение этих вод севернее Керченского пролива наблюдается под действием юго-восточного ветра со скоростью более 10 м/с, который отмечался с 20.11.2008.

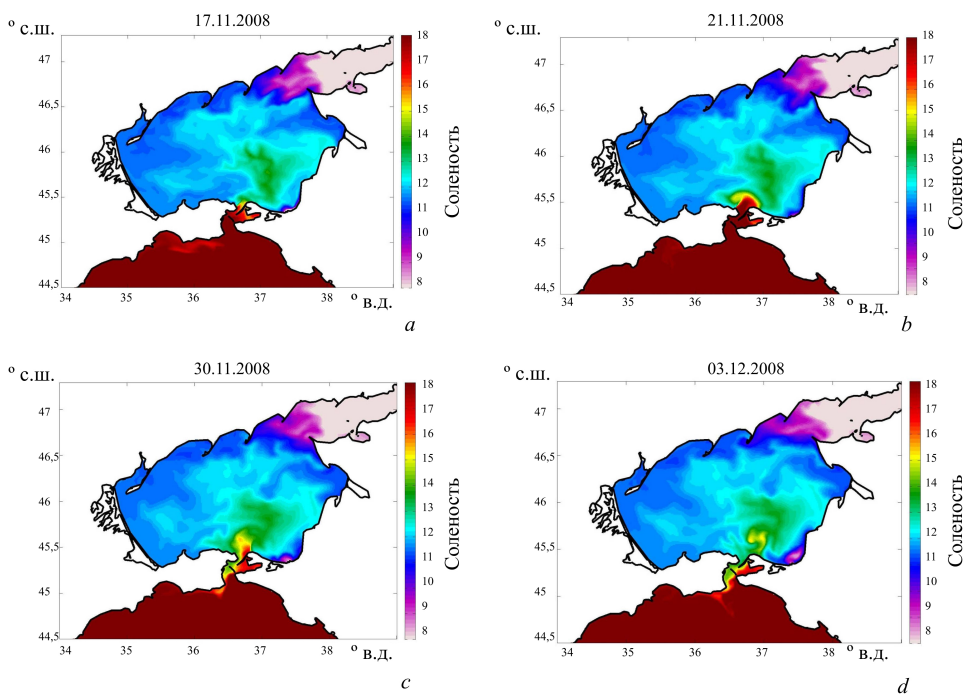
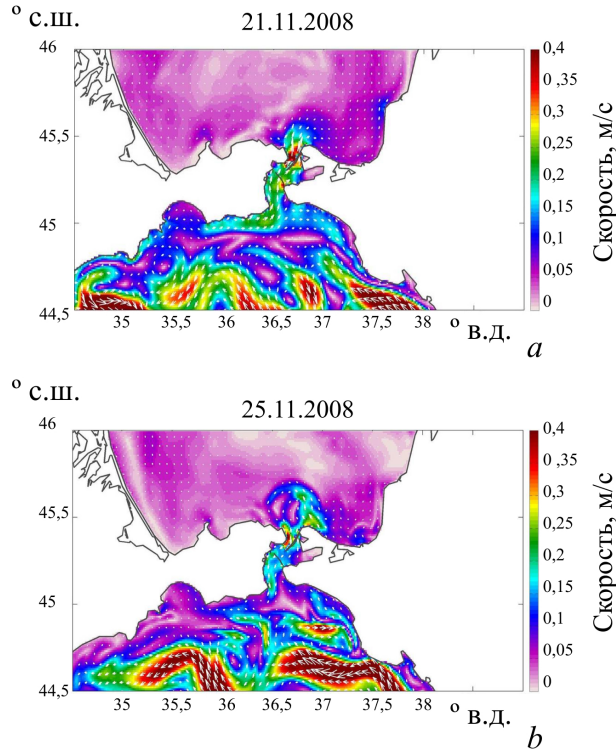


Рис. 10. Распространение черноморских вод в южной части Азовского моря по данным о полях солености в Азовском море, полученным в результате численного моделирования 17.11.2008 (a); 21.11.2008 (b); 30.11.2008 (c); 03.12.2008 (d)

Fig. 10. The Black Sea water propagation in the southern part of the Sea of Azov based on the data on salinity fields in the Sea of Azov resulted from numerical modeling on 17.11.2008 (a), 21.11.2008 (b), 30.11.2008 (c), and 03.12.2008 (d)

В дальнейшем с 22.11.2008 воды со значениями солености более 16 проникают в Азовское море на расстояние 20–30 км от пролива и далее двигаются на северо-восток. После значительного понижения скорости ветра (менее 7 м/с) и смены направления интенсивное продвижение черноморских вод через пролив прекращается 29.11.2008 г. Однако язык солоноватых вод со значениями солености 14, образующихся в процессе перемешивания, может наблюдаться еще продолжительное время (рис. 10, c, d). В основном в холодный период года они двигаются в циклоническом направлении, достигая широт 46–46,5° с. ш. Из-за значительного перепада плотности поток соленых вод становится неустойчивым и на его периферии можно наблюдать развитие мелких вихрей (диаметром 10–20 км). Наиболее часто отчетливый циклонический вихрь наблюдается у северной части пролива (рис 10, b, d; 11, b). Его образование, по-видимому, связано с бароклинной неустойчивостью, возникающей на границе залива более плотных черноморских вод.



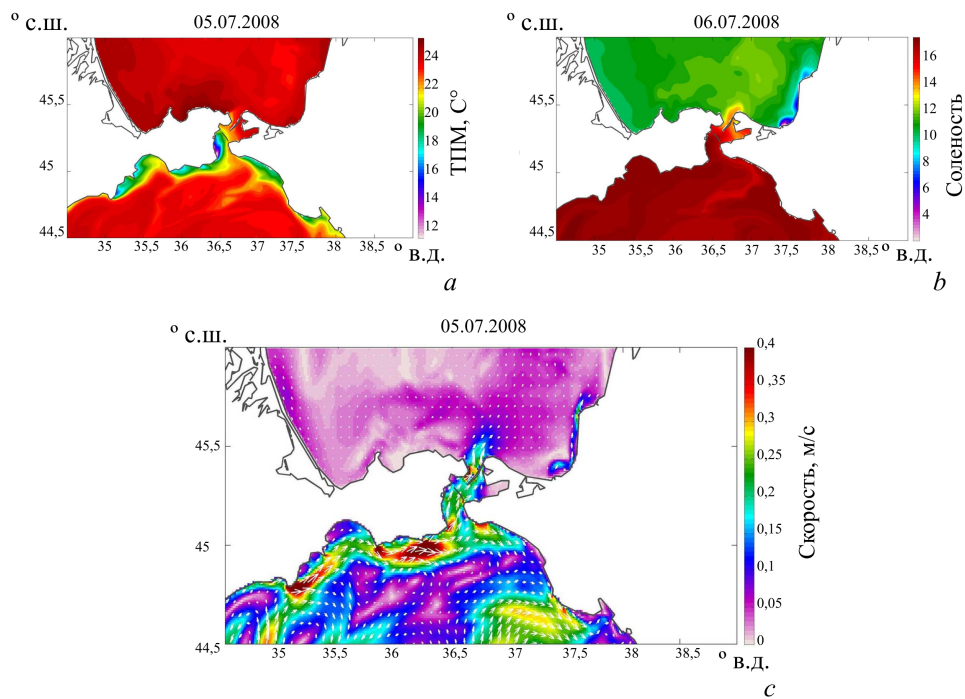
Р и с. 11. Поля скорости течений в Азовском море по результатам расчета модели *NEMO* за 21.11.2008 и 25.11.2008

F i g. 11. Current velocity fields in the Sea of Azov based on the results of the *NEMO* model calculations for 21.11.2008 and 25.11.2008

Анализ показал, что усиление южных и особенно юго-западных ветров часто сопровождается появлением интенсивных восточных течений у входа в пролив и у южной части Керченского и Таманского полуостровов. В летний период хорошо видно, что возникновение таких течений связано с прибрежным апвеллингом, вызванным этими ветрами. На резкой термической границе возникает циклоническое восточное фронтальное течение, которое в проливе направлено на северо-восток. Пример такого случая, выявленного по результатам моделирования в начале июля 2008 г., представлен на рис. 12.

На карте температуры (рис. 12, *a*) отчетливо наблюдается сгон на южном берегу Керченского полуострова, возникший в результате действия юго-западных ветров. Наиболее резкий апвеллинг отмечается в западной части Керченского полуострова, где температура поднятых холодных вод на 10° ниже температуры окружающих вод. На рис. 12, *с* хорошо видны восточные течения со скоростями 20–40 см/с, образовавшиеся на фронте апвеллинга в результате возникновения резких перепадов плотности. На периферии сгона в Керченском проливе возникают северные течения, которые вызывают поступление черноморских вод со значениями солёности более 16 в Азовское море (рис. 12, *b*) с задержкой 1–2 дня. Этот пример показывает, что фронтальные апвеллинговые течения, возникающие при действии западных и юго-западных

ветров, наряду с чисто дрейфовыми течениями, являются одной из важных причин усиления затоков черноморских вод в Азовское море.



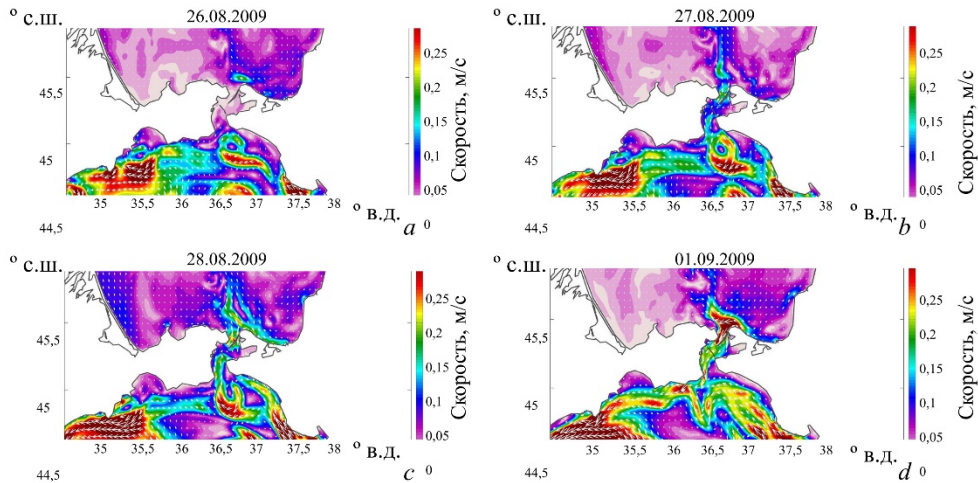
Р и с. 12. Усиление затоков черноморских вод при развитии апвеллинга на Керченском полуострове по данным *NEMO*: *a* – карта ТПМ за 5 июля 2008 г.; *b* – карта солёности за 6 июля 2008 г.; *c* – карта скорости течений за 5 июля 2008 г.

Fig. 12. Intensification of the Black Sea water inflows during the development of upwelling near the Kerch Peninsula coast based on the *NEMO* data: *a* is the SST map for July 5, 2008; *b* is the salinity map for July 6, 2008 and *c* is the current velocity map for July 5, 2008

Кроме этого, по всей видимости, именно эти течения переносят примесь, поступившую ранее из Азовского моря, на восток, что вызывает резкое увеличение мутности у Таманского полуострова, как было показано в работе [8].

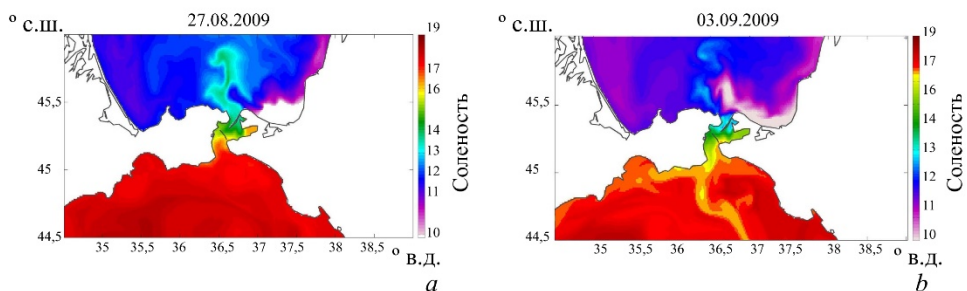
В то же время по результатам моделирования в некоторых случаях (~ 10 %), как и по спутниковым данным, затоки черноморских вод отмечались при северных ветрах. Анализ данных численного моделирования показал, что причиной такого явления, вероятно, выступает воздействие мезомасштабной динамики к югу от пролива. Подобный процесс наблюдался 24.08.2009–30.08.2009, когда на Керченско-Таманском шельфе наблюдалось прохождение интенсивного антициклона с орбитальными скоростями 0,2–0,3 м/с (рис. 13, *a*). Вихрь двигался на запад со скоростью перемещения около 0,05 м/с. В западной части антициклона интенсивные течения были направлены на север. При прохождении периферии этого вихря в Керченском проливе возникло достаточно сильное северное течение со скоростями 0,1–0,2 м/с (рис. 13, *b*). Такое течение наблюдалось в течение трех дней с 27 по 30 августа

2009 г., что, вероятно, привело к значительному проникновению соленых черноморских вод в Азовское море (рис. 14). Более соленые воды Черного моря проникли на 50–60 км в Азовское море (рис. 13, *b, c*; 14, *b*). При этом в представленный период преобладал ветер северо-восточного направления.



Р и с. 13. Карты скорости течений в районе Керченского пролива во время прохождения антициклона на Керченско-Таманском шельфе: *a* – до взаимодействия антициклона с проливом; *b, c* – при взаимодействии с западной периферией; *d* – при прохождении восточной периферии антициклона

F i g. 13. Current velocity maps in the Kerch Strait region during passing of the anticyclone on the Kerch-Taman shelf: *a* – before the anticyclone – strait interaction; *b, c* – during interaction with the western periphery and *d* – when passing of the eastern periphery of an anticyclone



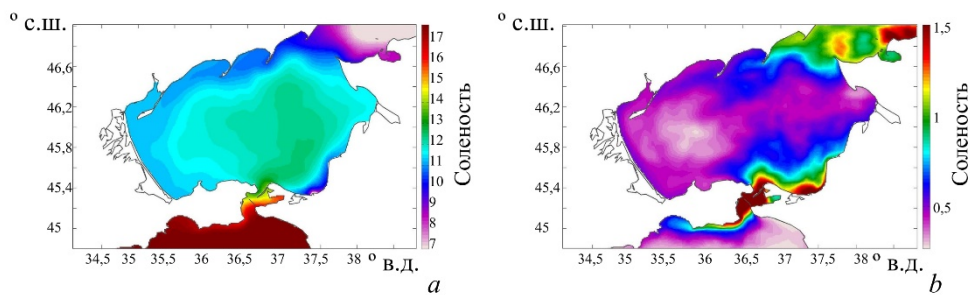
Р и с. 14. Поля солёности 27 августа 2009 г., во время усиления северных течений при взаимодействии с западной периферией антициклона (*a*), 3 сентября 2009 г., после усиления южных течений и захвата пресных азовоморских вод антициклоном (*b*)

F i g. 14. Salinity fields on August 27, 2009 during intensification of the northern currents at interaction with the anticyclone western periphery (*a*) and on September 3, 2009, after the southern currents intensified and the Azov Sea fresh waters were trapped by the anticyclone (*b*)

Как и в предыдущем случае, после затора плотные воды становились неустойчивыми, в результате чего происходило образование циклонической вих-

ревой структуры на границе области соленых вод. В дальнейшем антициклонический вихрь, вызвавший это возмущение, сместился на запад и течение сменило направление на противоположное (см. рис. 13, *d*). В этот период происходит усиленное поступление опресненных азовоморских вод в Керченский пролив. Этот пример демонстрирует значимое влияние мезомасштабной циркуляции на пульсации водообмена между Азовским и Черным морями.

Карты осредненной солености за 2008–2009 гг. (рис. 15, *a*) и ее дисперсии (рис. 15, *b*) наглядно показывают основные особенности распространения соленых черноморских вод. На рис. 15, *a* можно наблюдать язык соленых вод, который движется на северо-восток от устья пролива, оказывая значимое влияние, по крайней мере, на всю восточную часть Азовского моря. Наиболее выражен язык в юго-восточной области бассейна с координатами $45,2^{\circ}$ – 46° с. ш., $36,5^{\circ}$ – $37,5^{\circ}$ в. д. Затоки черноморских вод вызывают значительное увеличение дисперсии солености (рис. 15, *b*), которая имеет максимум в северо-восточной и юго-восточной частях моря. В первой области такая дисперсия во многом связана с динамикой распространения опресненных вод р. Дона в мелком Таганрогском заливе. В юго-восточной части Азовского моря находится значительно менее обширная область высоких значений среднеквадратичного отклонения солености, связанная с выносом вод р. Кубани. К северу и востоку от пролива наблюдается еще одна зона высокой изменчивости, которая вызвана периодическими затоками черноморских вод. Отметим, что у этой области существует симметричная часть в Черном море к югу от Керченского полуострова. Она связана с периодическими интенсивными поступлениями азовских вод в Черное море, которые впоследствии в основном распространяются на запад, часто до Феодосийского залива [8].



Р и с. 15. Осредненные за 2008–2009 гг. соленость (*a*) и среднеквадратичное отклонение солености (*b*)

Fig. 15. Averaged for 2008–2009 salinity (*a*) and standard deviation of salinity (*b*)

3.3. Сезонная и межгодовая изменчивость затоков черноморских вод

Анализ результатов модельных расчетов также подтверждает выраженную сезонность распространения черноморских вод в акватории Азовского моря. Временная изменчивость осредненных по глубине солености и меридиональной скорости течений, а также однонаправленного потока соли в верхнем слое через сечение Керченского пролива вдоль линии широты $45,4^{\circ}$ с. ш. от $36,65^{\circ}$ до $36,8^{\circ}$ в. д. по результатам моделирования представлена на рис. 16.

Однонаправленный поток соли F рассчитывался только для случаев $V_y > 0$, т. е. когда скорость течений (V_y) была направлена на север по формуле

$$F = \int_0^z \int_{x_1}^{x_2} (S - \langle S \rangle) \cdot v dz dx.$$

Здесь S – соленость; v – меридиональная скорость течений; $\langle S \rangle = 13,5$ – средняя соленость на разрезе; x_1 и x_2 – границы разреза.

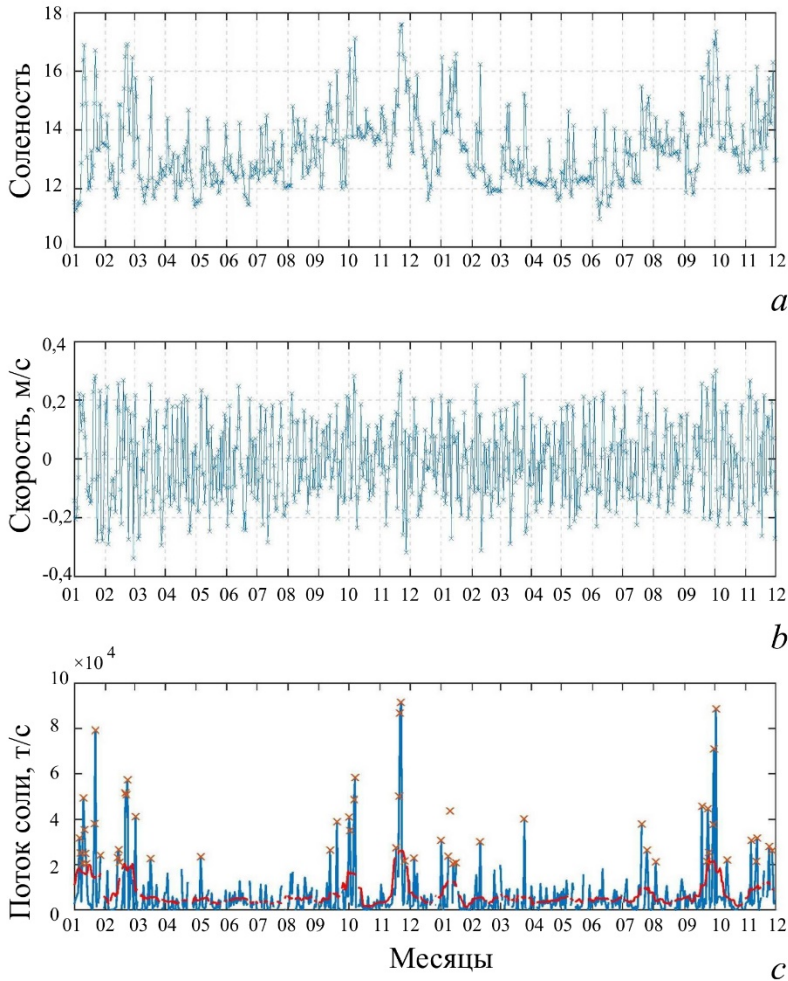
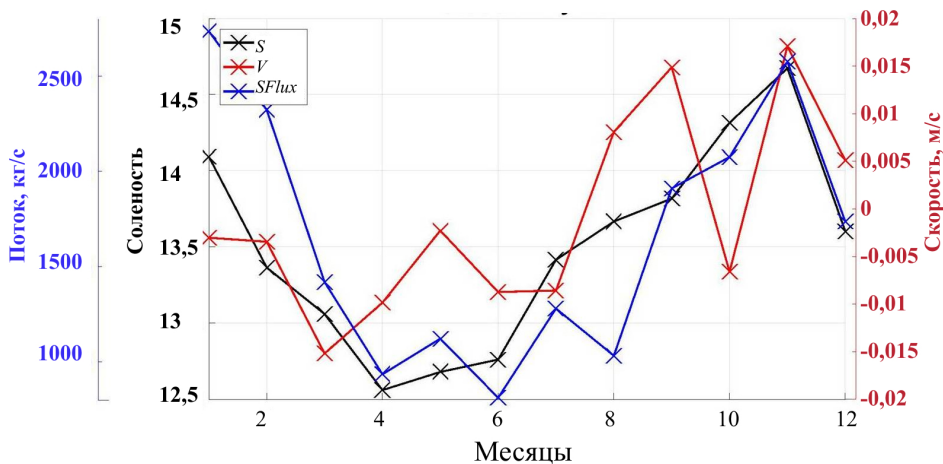


Рис. 16. Временная изменчивость средней по глубине солености (а), меридиональной скорости течений (б), потока соли (с) на разрезе по линии широты 45,4°. Красные крестики демонстрируют выделенные случаи затоков; красная кривая – сглаженная изменчивость

Fig. 16. Temporal variability of the depth-average salinity (a), meridional current velocities (b) and salt flux (c) on the section along 45.4° N. Red crosses show the selected cases of inflows; red curve is smoothed variability

Скорость вод в Керченском проливе характеризуется выраженной высокочастотной изменчивостью, связанной с колебаниями скорости ветра (рис. 16, *b*). При осреднении по глубине (рис. 17) проявляется сезонный ход с относительно малыми амплитудами: наибольшие положительные значения (0,02 м/с) отмечаются в осенний период (сентябрь и ноябрь), отрицательные – в весенне-летний (–0,02 м/с).



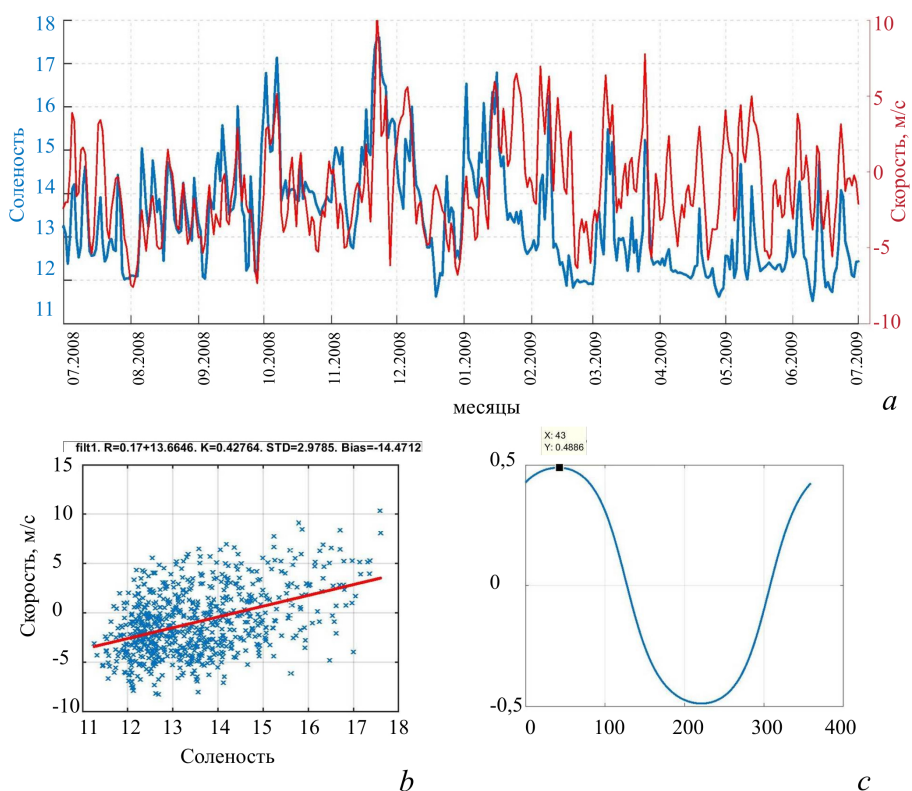
Р и с. 17. Сезонный ход средней по глубине солёности (S), меридиональной скорости течений (V_y) и потока соли вдоль линии широты $45,4^\circ$ с. ш.

F i g. 17. Seasonal variations of the depth-average salinity (S), meridional current velocities (V_y) and salt flux along 45.4° N

Сходные, но более выраженные особенности сезонного хода наблюдаются в поле солёности (рис. 17). В зимний период солёность в проливе увеличивается в среднем от 13 до 14,5. Такой рост солёности связан со снижением речного стока и увеличением испарения. Кроме этого, интенсификация вертикального перемешивания из-за зимней конвекции, начиная с осенних штормов, приводит к вовлечению глубинных вод в верхние слои Чёрного моря, способствуя значительному увеличению солёности. На эти изменения накладываются пульсации солёности, связанные с затоками черноморских вод, которые гораздо более выражены в зимний период года, когда средняя солёность на разрезе может достигать значений 16–17 (рис. 16, *b*).

Кроме того, такие особенности изменчивости связаны с усилением штормовых ветров южного направления в этот период года [22]. Корреляция между среднесуточными значениями меридиональной скорости ветра (W_y) и солёностью составляет $\sim 0,45$ (рис. 18, *a, b*). Зависимость этой корреляции от ветров различных направлений показана на рис. 18, *c*. Наибольшее значение корреляции наблюдается при повороте вектора скорости на 43° (по часовой стрелке), если отсчитывать от северного направления, т. е. связано с действием юго-западных ветров. Как показано в предыдущем разделе, такая зависимость связана с влиянием ветра на возникновение сгонов в Керченском проливе,

способствующих северному переносу соленых вод под действием интенсивных фронтальных апвеллинговых течений.



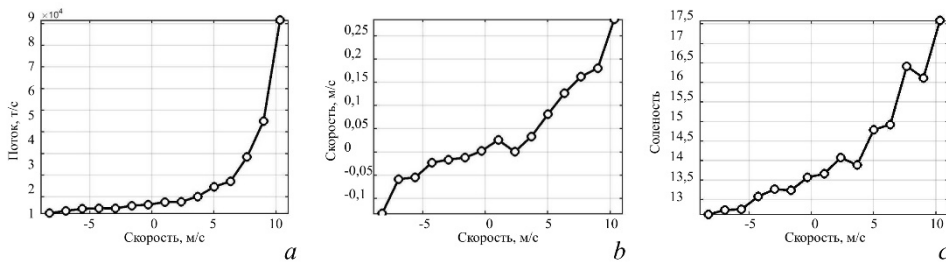
Р и с. 18. Временная изменчивость солености и меридиональной скорости ветра на разрезе вдоль линии широты 45.4° с. ш. (а); диаграмма рассеяния между соленостью и меридиональной компонентой скорости ветра для ветров различных направлений и скоростью ветра (b); изменчивость коэффициента корреляции между соленостью и скоростью ветра для ветров различных направлений (с)

Fig. 18. Temporal variability of salinity and meridional wind speed on the section along 45.4° N (a); scatterplot between salinity and meridional component of wind speed (b), and variability of the correlation coefficient between salinity and wind speed for the winds of different directions (c)

Средняя зависимость V_y от W_y имеет линейный характер (рис. 19, а), в то время как зависимость S от W_y – квадратичный (рис. 19, б). Резкий рост солености при усилении ветра связан как минимум с тремя процессами: горизонтальной адвекцией соленых черноморских вод под действием ветра, интенсификацией турбулентного перемешивания под действием ветра, усилением вертикальной адвекции под действием сгонных ветров. Последние два процесса вызывают поступление глубинных вод в верхние слои и увеличивают соленость затекающих черноморских вод.

Поскольку поток соли есть произведение скорости на соленость, то его зависимость от скорости ветра является степенной функцией и поток резко растет во время самых сильных ветров (рис. 19, с). Усиление северных течений и рост солености верхнего слоя приводят к интенсификации потоков соли

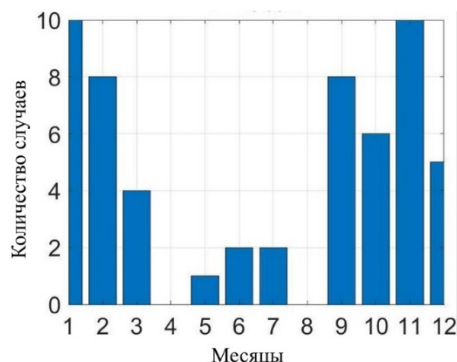
в зимний период (рис. 19, *a*). В это время величина потока в отдельные дни может достигать 60–80 т/с. Такие затоки наблюдаются более продолжительное время.



Р и с. 19. Средняя зависимость потока соли (*a*) из Азовского в Черное море, скорости (*b*), солености (*c*) от меридиональной скорости ветра

F i g. 19. Average dependence of the salt flux (*a*) from the Azov Sea to the Black Sea, velocity (*b*) and salinity (*c*) upon the meridional wind speed

Для оценки сезонной изменчивости количества заток было рассчитано число дней в году, в которых F превышал 20 т/с. Такие события отмечены красными крестиками на рис. 16, *c*. Сезонный ход количества дней в месяце, в которые наблюдался заток, представлен на рис. 20. Как и по спутниковым данным, наблюдается сезонный ход этих событий с максимумом в зимний период и минимумом в летний. Наибольшее их количество в целом отмечается с сентября по февраль, а наименьшее – с апреля по август. Максимальное количество дней с затоками – 10, т. е. треть всего месяца, – соответствует январю и ноябрю, а в апреле и в августе в 2008–2009 гг. затоки не зафиксированы. В ноябре и январе среднемесячные оценки потока соли через пролив составляют 3 т/с. Отметим, что в данной части работы анализ проводился на основании достаточно короткого двухлетнего периода расчета и полученные оценки сезонного хода могут иметь особенности в другие годы.



Р и с. 20. Среднее количество дней в месяце, в которые наблюдался заток черноморских вод в Азовское море согласно данным расчетов модели *NEMO* за 2008–2009 гг.

F i g. 20. Average number of days in the months during which the Black Sea water inflows to the Sea of Azov were observed (based on the *NEMO* model calculations for 2008–2009)

Заключение

В настоящей работе впервые на основе долговременных спутниковых данных и результатов численного моделирования исследована пространственно-временная изменчивость черноморских затоков вод в Азовское море.

Затоки черноморских вод хорошо выделяются по полю спутниковой яркости (на длине волны 551 нм), характеризующей наличие рассеивающей взвеси, так как черноморские воды в основном значительно прозрачнее азовских, за исключением событий интенсивного цветения кокколитофорид. Вместе с тем при анализе необходимо отбрасывать ситуации, связанные с неоднородностью волнового воздействия на взмучивание придонной взвеси при действии северо-восточных ветров. Дополнительную информацию о затоках дают данные о ТПМ и концентрации хлорофилла *a*.

По ежесуточным спутниковым данным за 2003–2020 гг., исключая дни с облачным покровом, ежегодно выявляется 3–5 явных случаев распространения черноморских вод в Азовском море. При этом продолжительность проявления черноморских затоков по спутниковым данным в среднем составляет 1–3 сут. По данным о солености за 2008–2009 гг., полученным на основе результатов численного моделирования, количество таких событий предположительно составляет около 20 в год, а продолжительность может достигать 5–7 дней. Такие различия между результатами, вероятно, связаны с недостатками спутниковых данных: влиянием облачности, спецификой изменчивости оптических характеристик вод.

По спутниковым данным за 2003–2020 гг., черноморские воды после транспорта через Керченский пролив наблюдаются в основном в южной, юго-восточной и восточной частях Азовского моря. При этом площадь их проявления может достигать более 2000 км². Согласно данным численного моделирования за 2008–2009 гг., соленые черноморские воды в Азовском море двигаются на восток, а затем на север в циклоническом направлении и достигают северной части Азовского моря, что связано с преобладающей циклонической циркуляцией бассейна. При этом на фронте затекающих соленых вод, вероятно, образуются вихревые структуры. Особенно интенсивные вихри циклонического знака могут формироваться к северу от Керченского пролива. Черноморские воды оказывают важное влияние на средние характеристики поля солености Азовского моря, значимое в его центральной и восточной частях. Поступление этих вод является одной из важных причин максимальной изменчивости солености в юго-восточной части Азовского моря.

Спутниковые данные и результаты моделирования показывают, что наиболее интенсивное поступление черноморских вод в Азовское море может наблюдаться в осенне-зимний период. Наиболее часто по спутниковым измерениям черноморские затоки выявлялись в холодное время года. Максимальное количество затоков наблюдалось в ноябре (11 случаев) и марте (10 случаев). Меньше всего черноморские затоки возникали с июня по октябрь (до 4 случаев за весь исследовательский период). Аналогичные результаты получены по данным численных расчетов за 2008–2009 гг.: в зимний период интенсивные затоки соленых вод в Азовское море (с потоком более 20 т/с) должны возникать в трети дней месяца, в летний же период их количество близко

к нулю. По данным расчетов, зимой возможно увеличение потока соли в Азовское море, который в ноябре и январе достигает в среднем 3 т/с, а в отдельные дни составляет до 60 т/с. Такой рост потоков соли, вероятно, во многом связан с увеличением солёности поступающих вод верхнего слоя Черного моря из-за зимнего перемешивания, вызывающего вовлечение глубинных солёных вод в верхние слои.

Анализ гидрометеорологических условий в исследуемом районе показал, что преобладающее влияние на возникновение затоков черноморских вод оказывает интенсивное действие ветра южных направлений, особенно юго-западного. Согласно модельным расчетам, зависимость потоков соли от скорости ветра имеет кубический характер. Такие ветры должны вызывать возникновение интенсивных северных течений в проливе, скорости которых составляют 15–25 см/с при штормах со скоростью ветра 7–10 м/с. А рост скорости ветра должен вызывать увеличение солёности, связанное с интенсификацией вертикального перемешивания и вовлечением глубинных вод в верхние слои Черного моря, что дополнительно способствует усилению потоков соли.

В тёплый период года важное влияние на усиление затоков оказывают фронтальные течения на границе прибрежных апвеллингов у Керченского полуострова, возникающие при действии юго-западных и западных ветров. Резкие градиенты температуры вызывают развитие восточных и северо-восточных течений, которые усиливают затоки черноморских вод.

В ряде случаев спутниковые и модельные данные позволяют предполагать вероятность поступления черноморских вод в неблагоприятных ветровых условиях, например при северных ветрах. Анализ данных численного моделирования показал, что причиной такого явления, вероятно, выступает прохождение синоптических антициклонов к югу от пролива. Эти антициклоны вызывают образование северных течений на своей западной периферии и могут способствовать переносу черноморских вод в Азовское море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1 : Азовское море. Севастополь, 2009. 400 с.
2. *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
3. *Ломакин П. Д., Боровская Р. В.* Возможность контроля системы течений в Керченском проливе на базе спутниковой информации // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь, 2005. Вып. 8. С. 255–257.
4. *Спиридонова Е. О., Панов Б. Н.* Изменения структурных показателей и среднего значения поля солёности вод Азовского моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 3. С. 305–317. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-305-317
5. *Панов Б. Н., Спиридонова Е. О.* Особенности изменений статистических характеристик горизонтальной структуры поля солёности вод Азовского моря // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2020. Т. 3, № 3. С. 17–24. EDN ZXDLTA. doi:10.47921/2619-1024_2020_3_3_17
6. *Бердников С. В., Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В.* Климатические условия и гидрологический режим Азовского моря в XX – начале XXI вв. // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2019. Т. 2, № 2. С. 7–19. EDN WHVLZP. doi:10.47921/2619-1024_2019_2_2_7

7. Матишов Г. Г., Григоренко К. С., Московец А. Ю. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона // Наука Юга России. 2017. Т. 13, № 1. С. 35–43. doi:10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43
8. 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
9. Особенности цветения цианобактерий в центральной части Азовского моря по спутниковым данным / Н. В. Василенко [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 166–180. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-5-166-180
10. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова [и др.]. Москва : ИКИ РАН, 2011. 480 с.
11. Мизюк А. И., Коротаев Г. К. Черноморские внутритропикноclinные линзы по результатам численного моделирования циркуляции бассейна // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, № 1. С. 112–122. EDN MHXSSO. doi:10.31857/S0002351520010101
12. Косенко Ю. В., Барабашин Т. О., Баскакова Т. Е. Динамика гидрохимических характеристик Азовского моря в современный период осолонения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2017. № 3-1. С. 76–82. EDN ZOKXLB. doi:10.23683/0321-3005-2017-3-1-76-82
13. Исследование водообмена в Керченском проливе по историческим данным и данным контактных измерений 2019 г. / И. Б. Завьялов [и др.] // Океанология. 2021. Т. 61, № 3. С. 377–386. EDN MJWWCC. doi:10.31857/S0030157421030199
14. 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. doi:10.31857/S268673972005014X
15. Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Численный анализ влияния скорости и направления продолжительно действующего ветра на циркуляцию вод Азовского моря с учетом и без учета водообмена через Керченский пролив // Океанология. 2018. Т. 58, № 1. С. 23–33. EDN YPKSAA. doi:10.7868/S0030157418010033
16. Еремеев В. Н., Иванов В. А., Ильин Ю. П. Океанографические условия и экологические проблемы Керченского пролива // Морской экологический журнал. 2003. Т. II, № 3. С. 27–40. EDN UBNGXV.
17. Иванов В. А., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Учет влияния водообмена через Керченский пролив на сгонно-нагонные процессы и течения в Азовском море // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 4. С. 3–14. EDN TOERTL.
18. Особенности водообмена через Керченский пролив по данным натурных наблюдений / Н. Н. Дьяков [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 1. С. 63–68. EDN VUYZNV.
19. Щербак С. С., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Возможности спутникового дистанционного зондирования для изучения влияния атмосферных процессов на формирование течений в Керченском проливе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4, № 4. С. 376–383. EDN NDPTIV.
20. Water exchange between the Sea of Azov and the Black Sea through the Kerch Strait / I. Zavalov [et al.] // Ocean Science. 2020. Vol. 16, iss. 1. P. 15–30. <https://doi.org/10.5194/os-16-15-2020>
21. NEMO ocean engine / G. Madec [et al.]. France : IPSL, 2016. 412 p. (Note du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace ; No. 27). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3248739>

22. Propagation of the Azov Sea waters in the Black sea under impact of variable winds, geostrophic currents and exchange in the Kerch Strait / A. A. Kubryakov [et al.] // Progress in Oceanography. 2019. Vol. 176. 102119. <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2019.05.011>
23. Кубряков А. А., Шокуров М. В., Станичный С. В. Характеристики облачности над Черноморским регионом в 1985–2009 гг. по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 41–49. EDN WTHXNZ.

Об авторах:

Василенко Надежда Вадимовна, старший инженер-исследователь, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 4710-2532, AuthorID: 1114885, Scopus Author ID: 57358387000**, nadinkot.nk@gmail.com

Алескерова Анна Адилловна, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 5796-2254, AuthorID: 1020460, Scopus Author ID: 57021552600**, annete08@mail.ru

Кубряков Арсений Александрович, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 4371-8879, AuthorID: 722633, Scopus Author ID: 37072750100**, arskubr@yandex.ru

Мизюк Артем Игоревич, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 8285-8260, AuthorID: 854379, Scopus Author ID: 36446217200**, artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Станичный Сергей Владимирович, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 8146-9454, AuthorID: 442139, Scopus Author ID: 6602344280**, sstnichny@mail.ru