

УДК 551.465, 551.506, 574.52

## ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АЗОВСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ ОСОЛОНЕНИЯ

© 2020 г. Академик РАН Г. Г. Матишов<sup>1,2</sup>, К. С. Григоренко<sup>1,\*</sup>

Поступило 10.02.2020 г.

После доработки 10.02.2020 г.

Принято к публикации 12.02.2020 г.

В работе исследуется режим течений Азовского моря на основе инструментальных измерений НИС “Денеб” в 2018 и 2019 г. С помощью ADCP – измерителей течений оценивается водообмен между Азовским и Черным морем через Керченский пролив. Показана очень высокая зависимость скоростей течений от скорости и направления ветра. При умеренных северных ветрах перенос вод на юг в Черное море может быть в 5–6 раз больше, чем на север в Азовское, при южных ветрах весь измерительный створ могут заполнять воды с северной компонентой скорости и объемом, до 30 раз превышающим средний для современного периода маловодья расход р. Дон. На основе инструментальных измерений подтверждена дрейфовая природа течений в Азовском море и зафиксированы ветви затоков соленых черноморских вод. По результатам экспедиционных наблюдений ЮНЦ РАН построена классификация типов стратификации вод Таганрогского залива, выделены четыре типа, также отмечено перестроение типов стратификации в связи с осолонением моря.

*Ключевые слова:* Азовское море, аридизация климата, динамика солености, маловодье р. Дон, морские течения

**DOI:** 10.31857/S268673972005014X

Азовское море – чрезвычайно динамичный с точки зрения изменений температуры и солености водоем, в предыдущих исследованиях проанализирован рост средней солености [1] до 2017 г. Наблюдения показывают, что значения солености, превышающие 15‰ в акватории собственно моря (к западу от косы Долгой Таганрогского залива) с 2015 г. встречаются постоянно. В работе [2] приведены результаты экспедиций во время и после обильного половодья р. Дон в 2018 г. Показано, что половодье с максимальными расходами более 1700 м<sup>3</sup>/с в ст. Раздорской способствовало вытеснению азовоморских вод только из восточной и центральной частей Таганрогского залива, а также усилению процессов фронтогенеза в его центральной и западной частях, при этом в собственно Азовском море по-прежнему наблюдалась соленость 14–15‰.

Азовское море имеет длину 300 км (без Таганрогского залива), и ширину – 200 км; в водном

бассейне такого масштаба наиболее часто повторяющаяся циркуляция должна иметь направление против часовой стрелки, соответственно черноморские воды должны проникать от Керченского пролива в Темрюкский залив и далее распространяться на север, формируя фронты солености, при перемешивании с водами р. Дон в Таганрогском заливе.

База данных наблюдений Южного научного центра за термохалинной структурой Таганрогского залива является более обширной, самые ранние записи получены в 2001 г., после чего стали проводиться ежесезонные съемки. Получены данные о характере стратификации вод в относительно полноводный период с 2000 по 2010 г., а также об их изменениях в период аридизации климата юга России в последующие годы.

Для анализа изменений структуры циркуляции Азовского моря использованы материалы экспедиций нис “Денеб” Южного научного центра РАН в 2018 и 2019 г. Во время экспедиций впервые для современного маловодного периода бассейна Азовского моря проведены инструментальные измерения объемов вод и скоростей течений, проходящих через Керченский пролив (рис. 1). Для построения схемы поверхностной и придонной циркуляции вод Азовского моря использованы данные экспедиции нис “Денеб” 16–

<sup>1</sup> Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup> Мурманский морской биологический институт Кольский Научный Центр Российской академии наук, Мурманск, Россия

\*E-mail: Klim\_grig@mail.ru

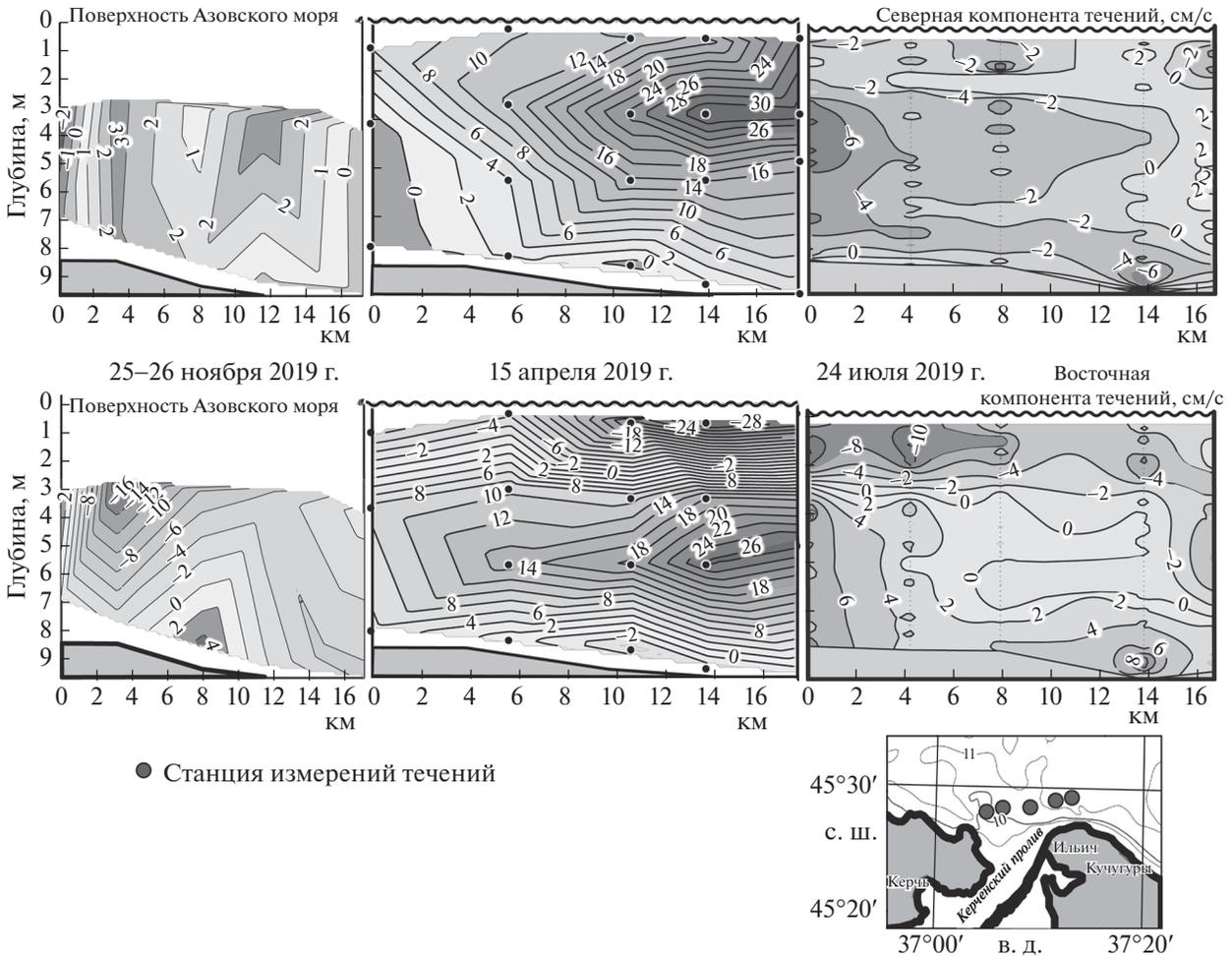


Рис. 1. Составляющие течений в северной части Керченского пролива 25–26 ноября 2018 г., 15 апреля и 24 июля 2019 г.

30 июля 2019 г. С помощью доплеровского измерителя течений Workhorse Sentinel ADCP выполнено 69 промеров вертикальной структуры течений (рис. 2, 3).

Измерения 25–26 ноября 2018 г. и 15 апреля 2019 г. проведены с помощью буйковой станции Aanderaa RCM 9LW, которая подвешивалась последовательно на нескольких горизонтах на каждой станции измерений. Во время ноябрьской съемки 2018 г. преобладал слабый ветер западной составляющей, и перенос вод через рассмотренный створ на север составил  $1920 \text{ м}^3/\text{с}$ . Весной 2019 г. получена более подробная схема циркуляции вод, измерения проводились при сильном (до  $14 \text{ м/с}$ ) ЮЮЗ-ветре, и перенос вод на север достиг  $17\,100 \text{ м}^3/\text{с}$  [2].

Исследования структуры разнонаправленных течений северной части Керченского пролива 24 июля 2019 г. проведены с помощью Workhorse Sentinel ADCP с дискретностью измерений  $0.2 \text{ м}$ , полученные результаты являются более точными по сравнению с результатами измерений Aanderaa RCM 9LW. Во время работы над восточной и

южной частями акватории Азовского моря господствовал устойчивый мало подвижный антициклон, благодаря чему наблюдался северный ветер с максимальной скоростью  $7.3 \text{ м/с}$ .

Практически на всем разрезе течения имели южную составляющую. В западной части разреза в придонном горизонте присутствует ядро течения на юг с максимальными скоростями до  $6 \text{ см/с}$ . Только на двух крайних станциях в восточной части отмечено движение вод на север со скоростью  $0\text{--}2 \text{ см/с}$ . Поверхность раздела между северной и южной компонентой течений соответствует аналогичной поверхности между восточной и западной компонентой, и она заглубляется от горизонта  $1\text{--}2 \text{ м}$  на западе и до  $8 \text{ м}$  на востоке разреза. Для глубин  $0\text{--}3 \text{ м}$  характерен перенос вод на запад, с максимальными скоростями более  $10 \text{ см/с}$  в западной части разреза, для придонного слоя – на восток, с максимальной скоростью  $8 \text{ см/с}$  на востоке разреза. Приблизительная оценка переноса вод на север равна  $729 \text{ м}^3/\text{с}$ , на юг –  $3988 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Усиление черноморской адвекции может приводить к изменению режима течений Азовского

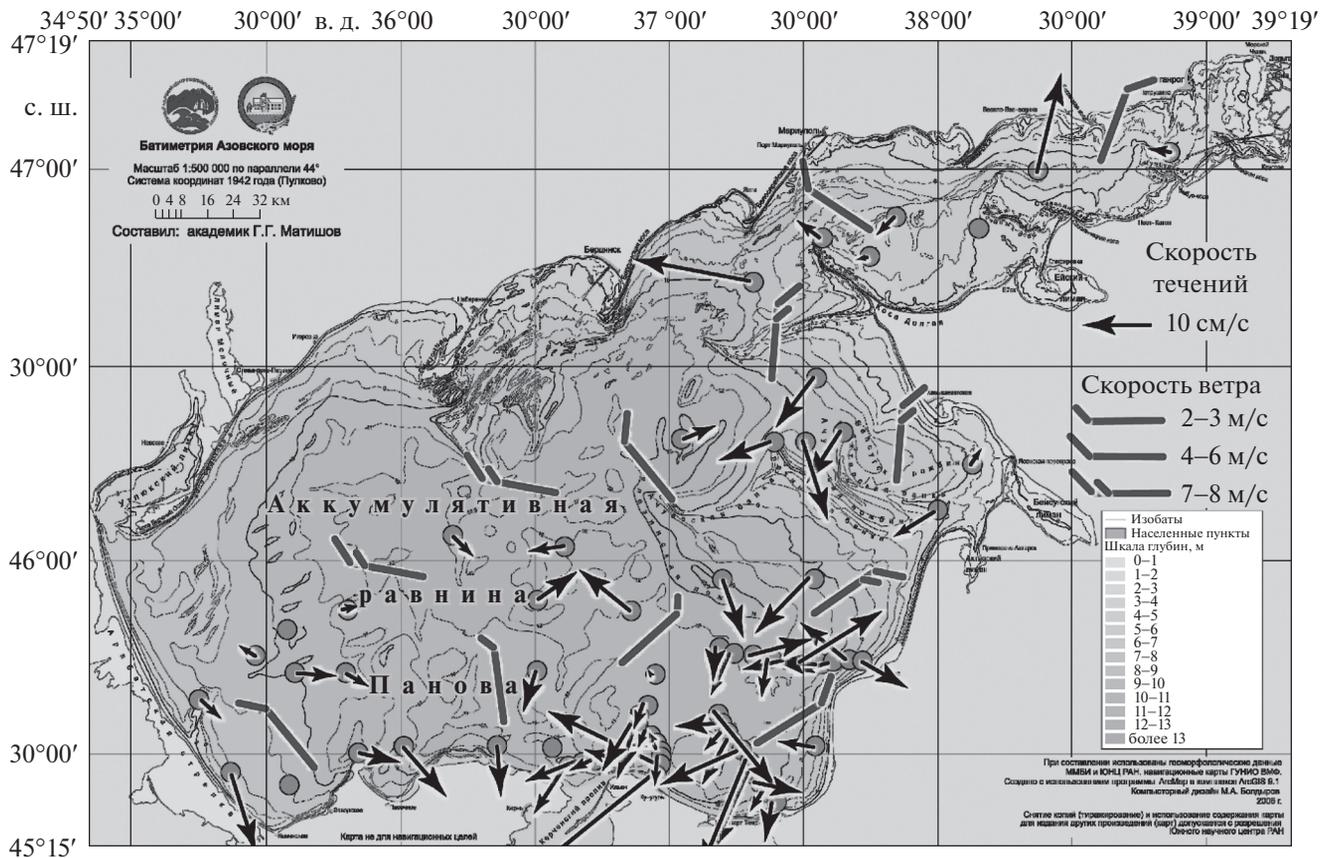


Рис. 2. Фактическое поле течений на поверхности Азовского моря в векторной форме 16–30 июля 2019 г., направление и скорость ветра представлены схематично.

моря. Проведем сравнение данных натуральных измерений со схемой циркуляции Азовского моря, построенной авторами работы [3] в 2009 г. в период распреснения – т.е. в период ослабленного притока соленых вод из Черного моря. Течения на поверхности практически полностью совпадают с направлением ветра в районе измерений, и только в шести точках течение направлено в противоположную сторону; при доминировании ветров северной составляющей заметно формирование ячеек циркуляции в западной части Таганрогского залива и в Ясенском заливе. Обнаруживается общая закономерность усиления течений у южных берегов.

Гипермелководность впадины моря приводит к тому, что наблюдаемые течения имеют чисто дрейфовую природу с быстрыми изменениями направления и скорости. Поле течений в придонном слое (рис. 3) при этом показывает, что на ряде удаленных от берегов станций наблюдается поворот вектора скорости течений от направления ветра вправо, характерный для экмановского дрейфового течения.

В придонных слоях Темрюкского залива заметны векторы течений противоположного направления относительно поверхности, эти тече-

ния направлены от Керченского пролива вдоль береговой линии, они представляют собой заток вод из Черного моря. На станциях, выполненных в районе устья Кубани, отмечена вертикальная стратификация солености: поверхностный слой распреснен до 12.7‰, тогда как придонный заполнен водами с соленостью 15–16‰ и инструментально зафиксированным максимумом 16.3‰ в Темрюкском заливе и 17.1‰ в районе северо-западной оконечности Таманского полуострова. Таким образом, экспериментальными наблюдениями установлено, что осолонение не способствовало усложнению чисто дрейфовой схемы циркуляции моря, за исключением юго-восточного района, где усилились струи соленых вод восточного и северо-восточного направления.

Таганрогский, Темрюкский заливы и Керченский пролив являются зоной смешения вод с разной соленостью, Таганрогский залив обладает наибольшей протяженностью и изменчивостью масштабов и градиентов фронтальных зон температуры и солености. За восемнадцать лет наблюдений отмечена деградация элементов термохалинной структуры вод Таганрогского залива. Если раньше повсеместно встречались струи, вихри, затоки и линзы вод разного происхождения, то

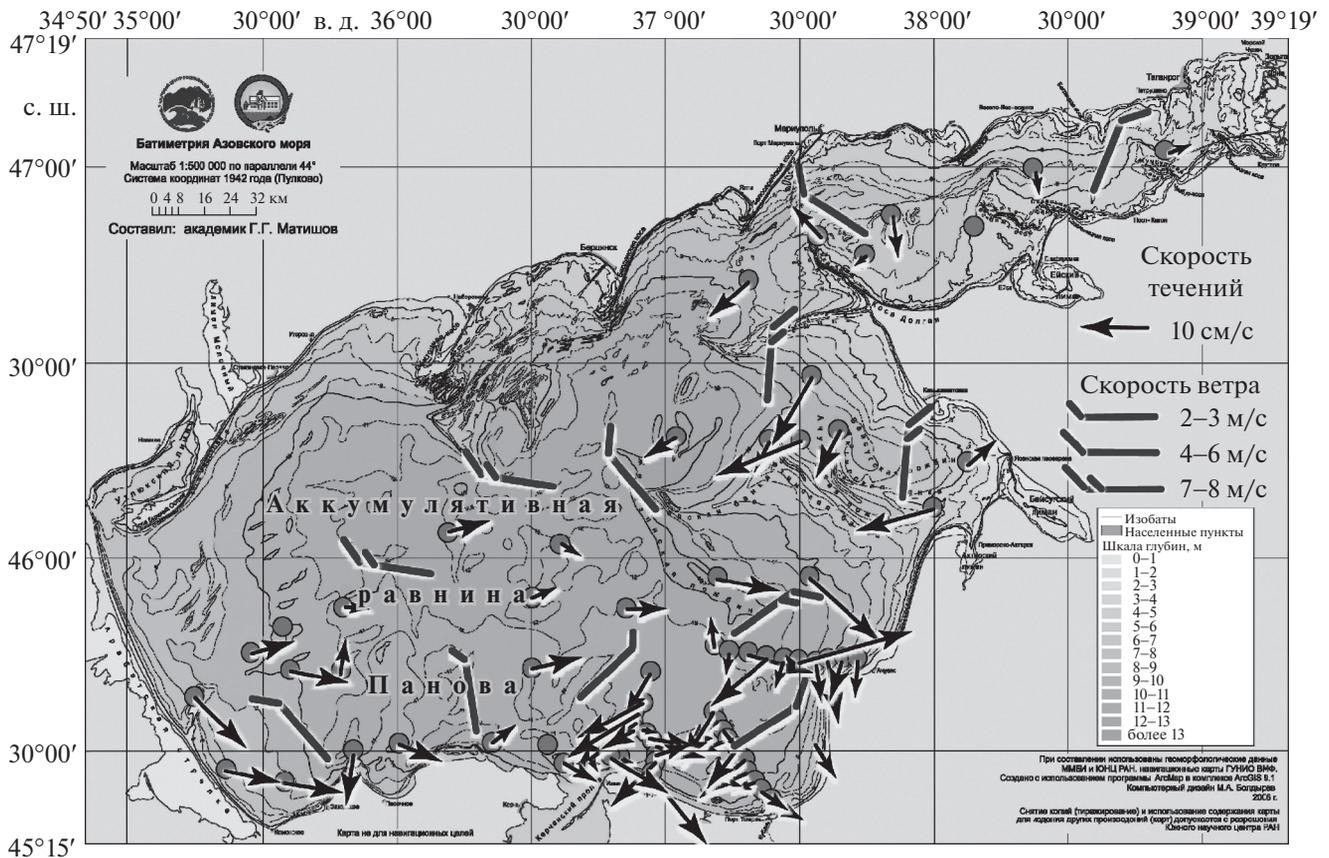


Рис. 3. Фактическое поле течений в придонном слое Азовского моря в векторной форме 16–30 июля 2019 г., направление и скорость ветра представлены схематично.

сейчас чаще всего наблюдаются две фронтальные зоны [4] – в восточной, приустьевой части залива, отделяющая перемешанные воды залива от пресного стока р. Дон, и в западной – между перемешанными водами и солеными водами Азовского моря.

Наблюдения за изменением солёности в аномальный, с точки зрения водности р. Дон, 2018 г., показали, что в периоды высокого стока ( $1700 \text{ м}^3/\text{с}$  в ст. Раздорской) в Таганрогском заливе формируется приустьевой фронт солёности, расположенный в восточной части; центральная часть заполняется перемешанными водами р. Дон и Азовского моря с вихреобразными участками пониженной и повышенной солёности, в западной части залива формируется второй фронт солёности, разделяющий перемешанные воды залива и солёные воды Азовского моря. При понижении пресного стока (менее  $500 \text{ м}^3/\text{с}$  в ст. Раздорской) в первую очередь разрушается второй фронт солёности, при этом солёность плавно понижается вплоть до приустьевого фронта; область, заполненная перемешанными водами сокращается, пока не формируется одноступенчатая структура пресных речных вод, состоящая из одного мощного, не обязательно с высокими градиентами, но большой

протяженности, фронта солёности и области распространения азовоморских вод, площадь которой по состоянию на 2019 г. увеличивается.

На рис. 4 представлены наиболее характерные типы стратификации вод Таганрогского залива от устья р. Дон до косы Долгой (экспедиция 29.06–04.07.2001, 16–24.09.2005 и 20–28.08.2018), либо до Сазальницкой косы (экспедиция 10–12.04.2012). Приведенные типы вертикального распределения солёности можно охарактеризовать как “нормальный” который соответствует типу стратификации, при котором изолинии солёности расположены последовательно и имеют почти вертикальную форму. “Двухслойный” – при этом типе стратификации в зонах непосредственного контакта пресных речных и солёных морских вод наблюдается слой скачка плотности; в этом случае фронтальная плоскость расположена под очень пологим углом к поверхности воды. “Турбулентный” – соответствует условиям вихреобразного перемешивания, формирования линз пресных (речных), слабосоленоватых и соленоватых вод. “Смешанный” – характеризует случаи, когда наблюдается как линзообразование, так и формирование слоев скачка солёности.

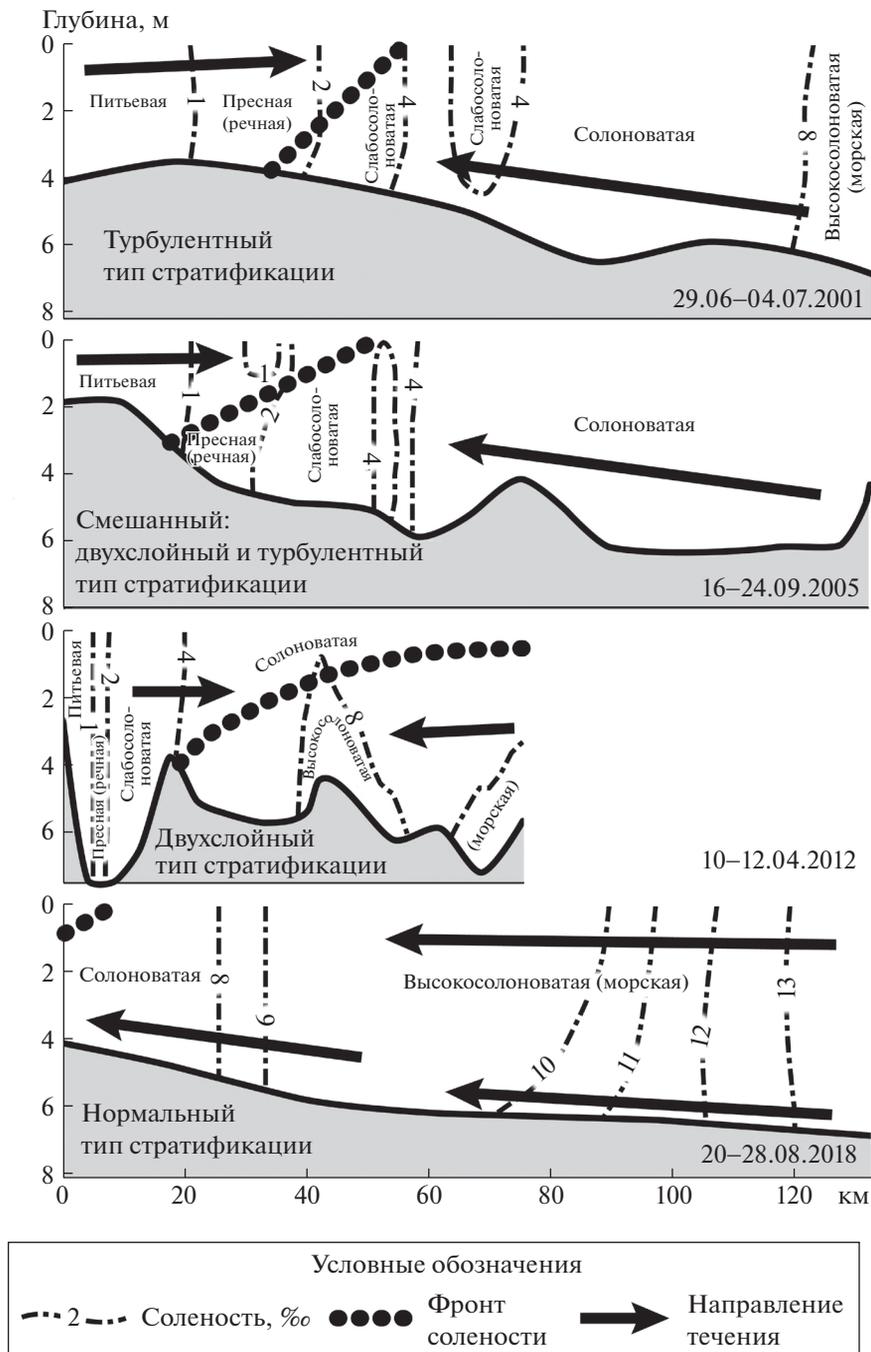


Рис. 4. Осолонение Таганрогского залива с 2001 по 2019 г. Классификация солёности вод дана по [5].

Падение стока р. Дон приводит к кардинальному перестроению термохалинной структуры Таганрогского залива. Начиная с 2012 г. в центральной части залива (район Сазальницкой косы) постоянно присутствуют высокосолончатые (морские) воды; при этом случаев наблюдения “турбулентного” и “смешанного” типов стратификации становится меньше.

Проведенный в работе анализ измерений вертикальной структуры течений Керченского про-

лива, полей течений Азовского моря, а также наиболее характерных типов стратификации вод Таганрогского залива позволяет сделать вывод о перспективах дальнейшего проникновения черноморских видов животных, характерных для высокосолончатых (морских) вод в освобожденные экологические ниши. Если в авандельте р. Дон часто наблюдаются слабосоленоватые и солончатые воды (до 5–7‰) [5], то в Таганрогском заливе с 2012 г. постоянно присутствуют высокосо-

лоноватые (морские) воды с соленостью более 8‰, и до 13–14‰, что выше зоогеографического порога обитания местной азовоморской фауны.

Серия проведенных измерений показывает исключительную метеозависимость структуры течений через Керченский пролив; величины и скорости могут варьироваться в очень высоких пределах. Оценочные значения притоков вод Черного моря могут быть в 30 раз больше, чем средние расходы р. Дон (400–500 м<sup>3</sup>/с) при южных ветрах, но структура вод Керченского пролива быстро перестраивается при изменении метеоусловий. Измерения показали, что при усилении южного ветра практически весь измерительный створ шириной 17 км могут заполнять воды северной составляющей течений со скоростями до 30 см/с; однако при северных ветрах обратный перенос вод в Черное море может быть в 5–6 раз выше, нежели в Азовское.

По сравнению с периодом распреснения схема поверхностных и придонных течений моря кардинальных изменений не претерпела. Почти на всей акватории наблюдается чисто дрейфовая схема циркуляции вод. Исключением является юго-восточная часть моря, где активизировались струи затоков черноморских вод; даже в условиях северных ветров в придонном горизонте наблюдаются воды с соленостью 15–17‰ и скорости течений восточного и северо-восточного направлений со скоростями 10–15 см/с.

Проникновение вод Черного моря приводит к формированию подпора высокосолоноватых (морских) вод в Таганрогском заливе и сокращению объема районов перемешивания с речными; в 2019 г. наблюдалась тенденция продвижения таких вод выше по заливу вплоть до 30–40 км от устья р. Дон. На сегодняшний день важной явля-

ется задача измерения скоростей течений непосредственно в Керченском проливе, который в наиболее узкой части более, чем втрое уже створа измерений нис “Денеб” в 2018–2019 гг. для более точного описания гидрофизического состояния Азовского моря.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проводились при поддержке Всероссийской организации “Русское географическое общество” “Азовская комплексная экспедиция”, договор № 08/2019–И для Г.Г. Матишова и реализации Государственного задания 0256–2019–0028 № гр. АААА–А18–118122790121–5 “Морские биогеосистемы юга России и их водосборы в условиях аридного климата, хозяйственного освоения и современных геополитических вызовов” для К.С. Григоренко.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В.* Многолетнее изменение средней солености Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572.
2. *Григоренко К.С., Олейников Е.П., Григоренко Е.Г.* Влияние половодья Дона 2018 г. на термохалинную структуру Азовского моря // Наука юга России. 2019 Т. 15. № 3. С. 63–69.
3. *Матишов Г.Г., Матишов Д.Г.* Новые представления циркуляции вод Азовского моря / Труды Южного научного центра Российской академии наук. Том 4: Моделирование и анализ гидрологических процессов в Азовском море. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 196–203.
4. *Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
5. *Матишов Г.Г., Григоренко К.С.* Причины осолонения Таганрогского залива // ДАН. 2017. Т. 477. № 1. С. 92–96.

## DYNAMIC MODE OF THE AZOV SEA IN THE CONDITION OF SALINATION

Academician of the RAS G. G. Matishov<sup>a</sup> and K. S. Grigorenko<sup>b, #</sup>

<sup>a</sup> *Yuzhny scientific center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-don, Russia*

<sup>b</sup> *Murmansky marine biological Institute Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: Klim\_grig@mail.ru*

We study the flow regime of the Azov Sea on the basis of instrumental measurements of RV “Deneb” in 2018 and 2019. Using ADCP – current meters, water exchange between the Azov Sea and the Black Sea through the Kerch Strait is estimated. A very high dependence of current velocities on wind speed and direction is shown. With moderate northerly winds, the advection of water to the south to the Black Sea can be 5–6 times more than to the north to the Azov Sea, Southern winds at all cross section can fill water with the north component of the velocity and the volume up to 30 times higher than the average for the present period of the Don lack of water. On the basis of instrumental measurements, the drift nature of the currents in the Azov Sea was confirmed and the branches of saline Black Sea waters were recorded. Based on the results of expeditionary observations of the SSC RAS, a classification of the types of stratification of the waters of the Taganrog Bay was constructed, four types are defined, and the restructuring of the types of stratification in connection with the salinization of the sea was also noted

*Keywords:* the Azov Sea, aridization of climate, salinity dynamics, Don lack of water, sea currents