

УДК 551.465,551.506,574.52

ТЕЧЕНИЯ АЗОВСКОГО МОРЯ В ПЕРИОД МАЛОВОДЬЯ ДОНА

© 2021 г. Г. Г. Матишов^{1,2}, К. С. Григоренко^{1, *}¹Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия²Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, Мурманск, Россия

*e-mail: klim_grig@mail.ru

Поступила в редакцию 02.06.2020 г.

После доработки 15.06.2020 г.

Принята к публикации 15.08.2020 г.

На основе судовых наблюдений НИС “Денеб” в 2018 и 2019 гг. исследуется водообмен между Черным и Азовским морями. Съёмки проводились при разных метеоусловиях, что привело к большому разбросу результатов. Северный ветер способствует формированию переноса вод на юг, в 5–6 раз превышающего перенос вод на север, южный приводит к заполнению всего измерительного створа шириной 17 км водами, движущимися на север, и объемом, до 30 раз превышающим средний для современного периода маловодья расход Дона. В работе построены схемы циркуляции вод Азовского моря на поверхности и в придонном горизонте, подтверждающие дрейфовую схему движения вод. Подробно описаны затоки черноморских вод в Темрюкский залив. На основе базы данных 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 солёности, маловодье Дона, морские течения

DOI: 10.31857/S0030157421020131

ВВЕДЕНИЕ

Солёность Азовского моря очень быстро меняется при колебаниях пресного стока впадающих в него рек, прежде всего Дона. В предыдущих работах проанализирован рост средней солёности [2] до 2017 г. Экспедиционные исследования показывают, что значения солёности, превышающие 15 е.п.с. в акватории собственно моря (к западу от косы Долгой Таганрогского залива) с 2015 г. встречаются постоянно. В работе [1] приведены результаты съёмок термохалинной структуры моря во время и после обильного половодья Дона в 2018 г. Приведенные результаты показывают, что половодье с максимальными расходами более 1700 м³/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 солёность 14–15 е.п.с. В работе [4] приводятся результаты измерений течений в Керченском проливе, но не на поперечных, а на продольных разрезах, из-за чего невозможно провести оценку водообмена между Азовским и Черным морями и сравнить с результатами работы [1].

Азовское море имеет длину 300 км (без Таганрогского залива), ширину – 200 км, в водном бассейне такого масштаба наиболее часто повторяющаяся циркуляция должна иметь в направлении против часовой стрелки, соответственно, черноморские воды должны проникать от Керченского пролива в Темрюкский залив и далее распространяться на север, формируя фронты солёности, при перемешивании с водами Дона в Таганрогском заливе, однако максимальная глубина 14 м приводит к тому, что дрейфовый перенос доминирует над геострофическим, при этом форма и направление береговых кос, а также наиболее частые случаи наблюдения черноморских вод (более 15 е.п.с.) в юго-восточной части моря позволяют предположить наличие хотя бы эпизодической циклонической циркуляции.

Таганрогский, Темрюкский заливы и Керченский пролив являются зонами смешения вод с разной солёностью, обладают большой протяженностью, изменчивостью масштабов и градиентов фронтальных зон температуры и солёности. За период наблюдений с 2001 г. отмечается общая деградация элементов термохалинной структуры вод Таганрогского залива, если раньше повсеместно встречались струи, вихри, затоки и линзы вод разного происхождения, то сейчас чаще всего наблюдаются две фронтальные зоны [8] –

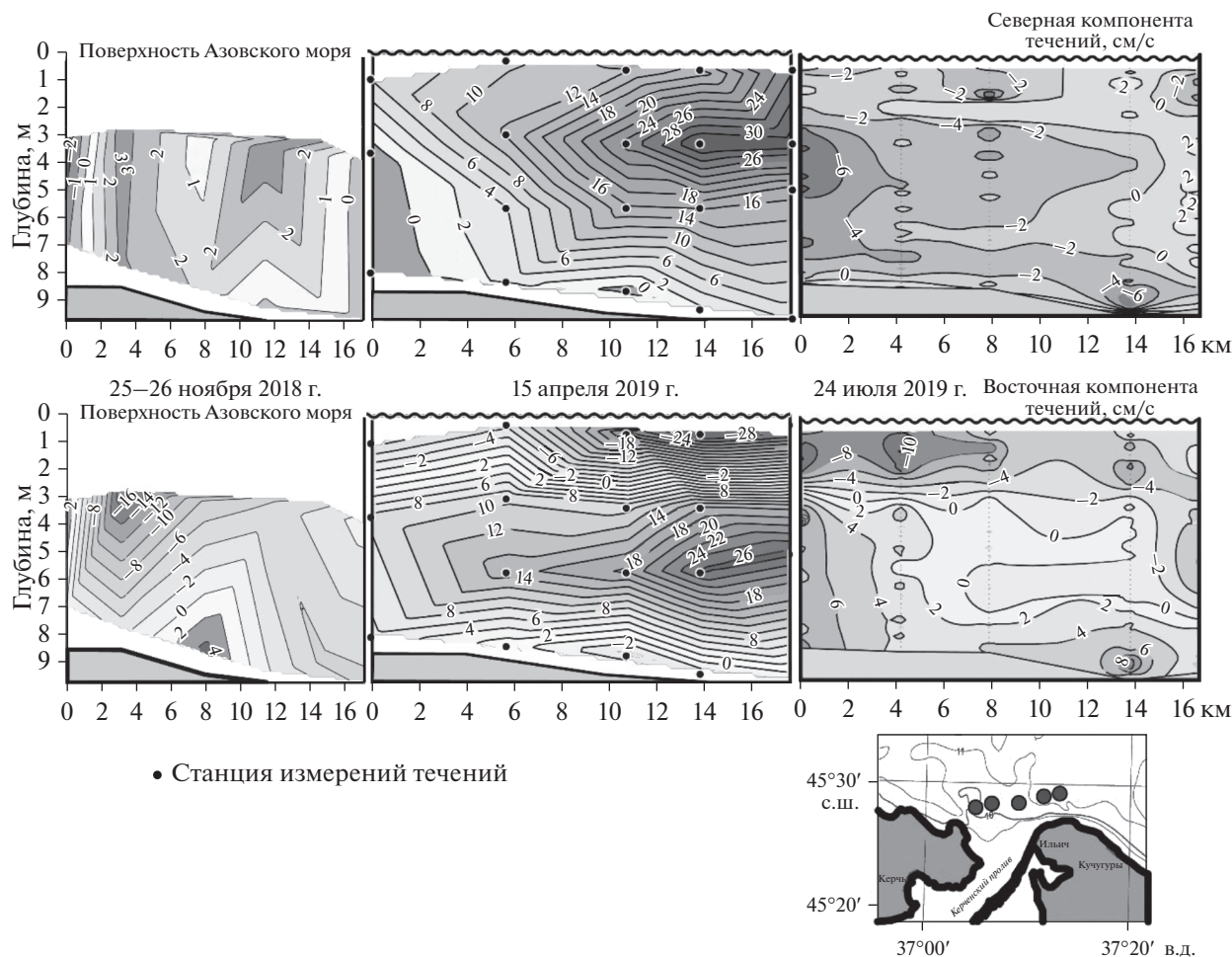


Рис. 1. Составляющие течений в северной части Керченского пролива 25–26 ноября 2018 г., 15 апреля и 24 июля 2019 г.

в восточной, приустьевой части залива, отделяющая перемешанные воды залива от пресного стока Дона, и в западной – между перемешанными водами и солеными водами Азовского моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наблюдения Южного научного центра РАН за термохалинной структурой Таганрогского залива начаты в 2001 г., после чего стали проводиться ежесезонные съемки. Полученные материалы характеризуют характер стратификации вод в относительно полноводный период с 2000 по 2010 гг., а также их изменения в период аридизации климата юга России в последующие годы.

Исследования циркуляции Азовского моря проводятся на борту НИС “Денеб” с 2018 г. С этого момента впервые для современного маловодного периода бассейна Азовского моря проведены три инструментальных измерения объемов вод и скоростей течений, проходящих через Керченский пролив (рис. 1). Съемки структуры тече-

ний северной части Керченского пролива 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. Для построения схемы поверхностной и придонной циркуляции вод Азовского моря использованы данные экспедиции НИС “Денеб” 16–30 июля 2019 г. С помощью доплеровского измерителя течений Workhorse Sentinel WHS 600 выполнено 69 промеров вертикальной структуры течений (рис. 2, 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ноябре 2018 г., во время измерений течений в северной части Керченского пролива, преобладал слабый ветер западной составляющей и перенос вод через рассмотренный створ на север составил 1920 м³/с. В апреле 2019 г. получена более подробная схема циркуляции вод, измерения проводились при сильном (до 14 м/с) юго-юго-

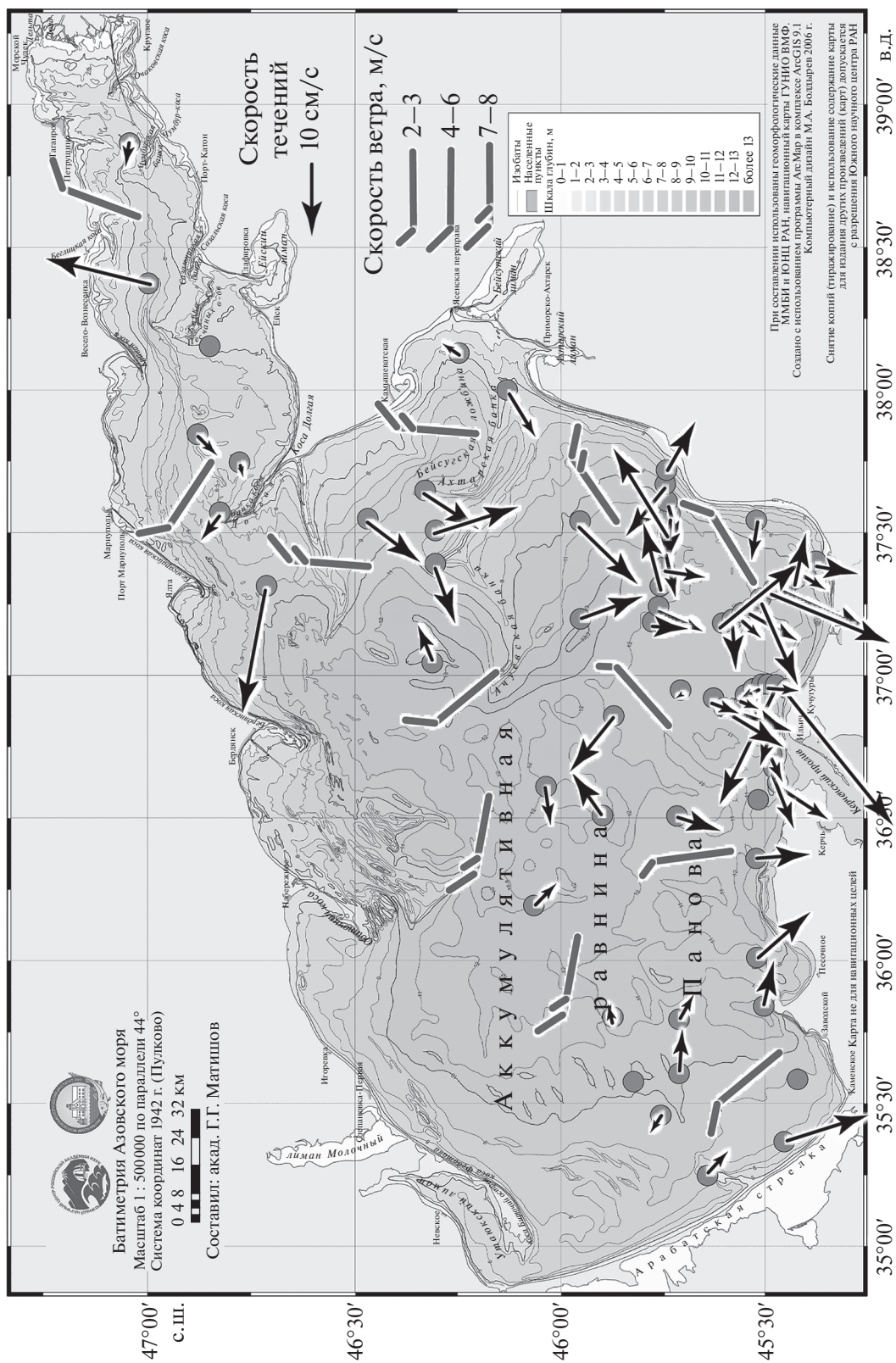


Рис. 2. Фактическое поле течений на поверхности Азовского моря в векторной форме 16–30 июля 2019 г, направление и скорость ветра представлены схематично.

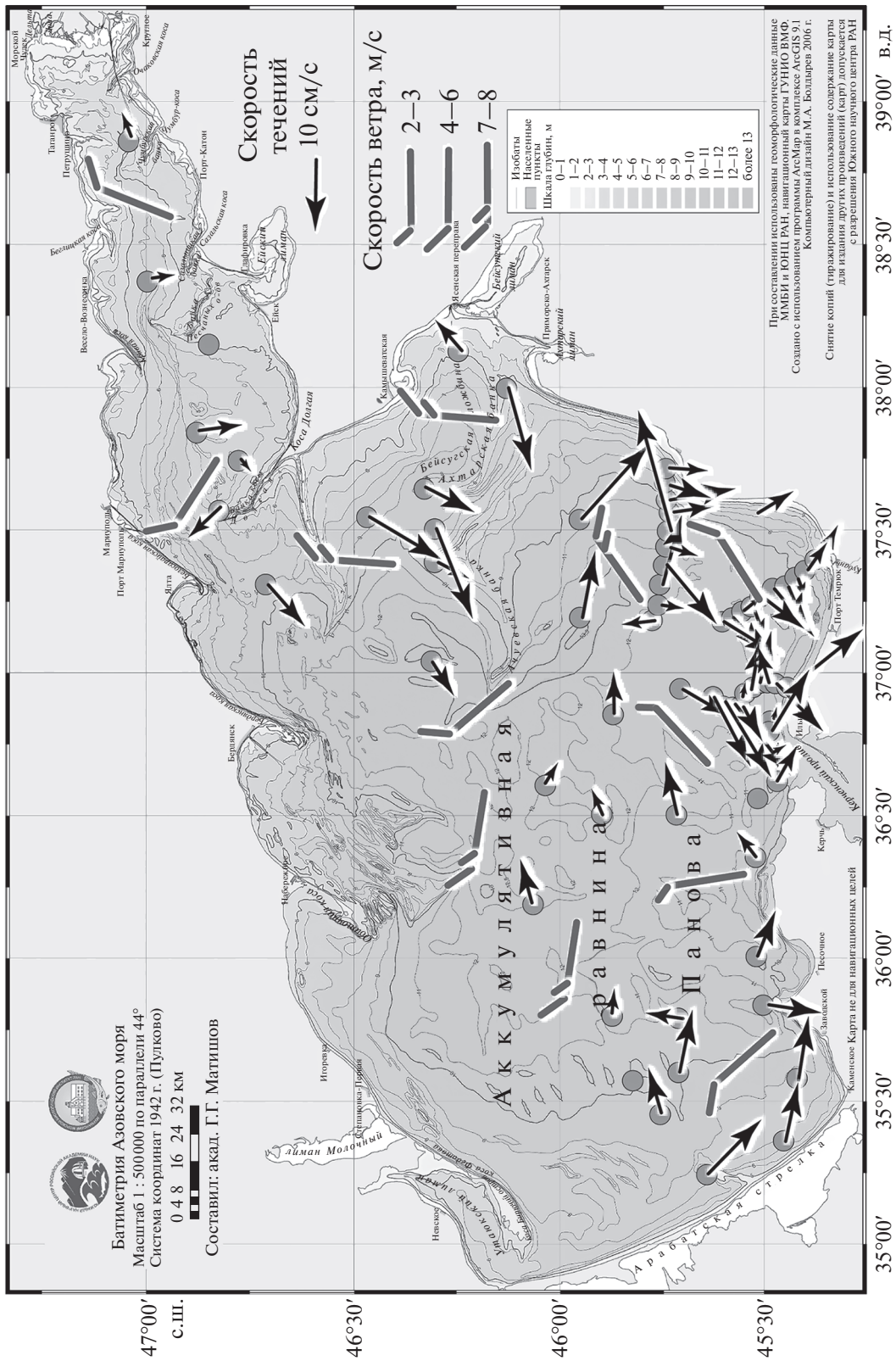


Рис. 3. Фактическое поле течений в придонном слое Азовского моря в векторной форме 16–30 июля 2019 г., направление и скорость ветра представлены схематично.

западном ветре, и перенос вод на север достиг $17100 \text{ м}^3/\text{с}$ [1].

24 июля 2019 г. исследования структуры разнонаправленных течений проводились с помощью Workhorse Sentinel WHS 600 с дискретностью измерений 0.2 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 малоподвижный антициклон и наблюдался северный ветер с максимальной скоростью 7.3 м/с.

Практически на всем разрезе течения имели южную составляющую, не отличаясь при этом, по сравнению с апрельской съемкой, высокими скоростями. В западной части разреза, в придонном горизонте обнаружено ядро течения на юг со скоростью до 6 см/с. Только на двух крайних станциях в восточной части отмечено движение вод на север со скоростью 0–2 см/с. Раздел между северной и южной компонентами течений аналогичен разделу между восточной и западной компонентами, он заглубляется от горизонта 1–2 м на западе и до 8 м на востоке разреза. Для приповерхностного горизонта и до глубины три метра характерен перенос вод на запад, с максимальными скоростями более 10 см/с в западной части разреза, для придонного слоя — на восток, с максимальной скоростью 8 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 приводит к усилению термохалинных градиентов в прикерченском районе и, как следствие, к изменению режима течений Азовского моря. Сравним натурные данные измерений с со схемой циркуляции Азовского моря, построенной авторами работы [6] в 2009 г., в период распреснения, т.е. в период ослабленного притока соленых вод из Черного моря. Течения на поверхности практически полностью совпадают с фактическим направлением ветра, полученным по данным судовой метеостанции в момент измерений, только в шести точках течение направлено в противоположную сторону. Во время действия ветров северной составляющей формируются ячейки циркуляции в западной части Таганрогского залива и в Ясенском заливе. Заметно усиление течений у южных берегов (рис. 2).

Поле течений в придонном слое (рис. 3) 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 течения направлены от Керченского пролива вдоль

береговой линии, они представляют собой заток вод из Черного моря.

Исследование полей солёности и структуры течений Темрюкского залива как наиболее подверженного влиянию затоков вод из Черного моря во время экспедиции выполнено подробно. По данным судовых наблюдений построено три разреза STD- и ADCP-профилирований (рис. 4 и 5).

На станциях, выполненных к западу от устья Кубани, отмечена вертикальная стратификация солёности с достаточно большими для Азовского моря перепадами: поверхностный слой распреснен до 12.5 е.п.с., тогда как придонный заполнен водами с солёностью 15–16 е.п.с. и инструментально зафиксированным максимумом 16.3 е.п.с. в Темрюкском заливе и 17.1 е.п.с. в районе северо-западной оконечности Таманского полуострова.

На разрезах солёности Темрюкского залива, в общем, выделяется область распреснения кубанскими водами в верхней части и придонный горизонт, заполненный черноморскими водами (рис. 4). В период измерений на всех выполненных разрезах в верхней части прибрежных станций обнаружено понижение солёности до 12.5 е.п.с., при этом на северном разрезе (А–А) наблюдались значения менее 12 е.п.с., на расстоянии 5.5 км от берега. Граница распространения вод со значениями менее 13 е.п.с., соответственно, расположена на расстоянии 10 км от берега на всех трех разрезах в северной части (А–А), центральной (Б–Б) и западной частях (В–В) Темрюкского залива. Интересно отметить, что струи вод с солёностью 12–12.5 е.п.с. на центральном и западном разрезах отрывались от береговой линии, и на крайних прибрежных станциях этих разрезов минимальная солёность на поверхности превышала 13 е.п.с.

Несмотря на воздействие северного ветра, выдвигавшего азовоморские воды через Керченский пролив, весь придонный горизонт западного разреза заполнен водами, солёность которых выше 15.5 е.п.с. (максимум 17.1 е.п.с.), причем слой, который ограничивает изолиния 15 е.п.с., имеет толщину до 4 м при глубине моря 12 м.

При движении вдоль берега моря далее в Темрюкский залив область, занимаемая черноморскими водами, сокращается, и на центральном разрезе солёные воды (более 15 е.п.с.) занимают только наиболее глубокие понижения дна слоем толщиной менее 2 м.

Для всех разрезов в прибрежной части характерно расслоение с высокими вертикальными градиентами солёности (12–12.5 е.п.с. на поверхности и до 14–15.5 е.п.с. в придонном горизонте).

Скорости течений в Темрюкском заливе нормализованы относительно плоскости разрезов, соответственно, течения, направленные против часовой стрелки, относительно берега моря, изображены с положительным знаком, по часо-

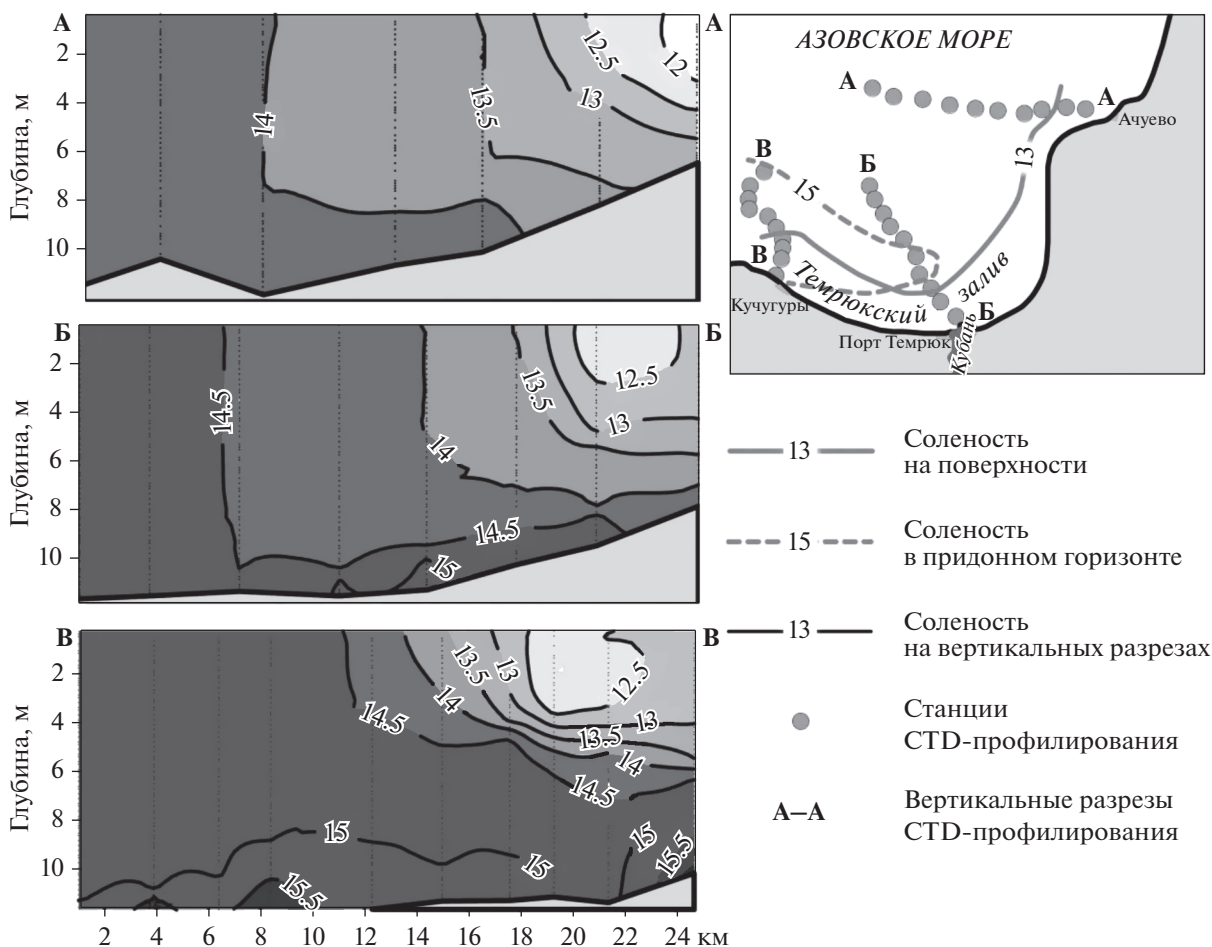


Рис. 4. Соленость Темрюкского залива Азовского моря по данным судовых наблюдений НИС “Денеб” 21 июля 2019 г.

вой стрелке – с отрицательным (рис. 5). Для всех разрезов характерно доминирование переноса вод в южном и западном направлении, что соответствует рис. 2 и 3, при этом на каждом обнаружены струи, направленные в противоположном направлении. В целом, для всех разрезов отсутствовала стратификация течений по вертикали.

На северном разрезе (А–А) выделен отдельный поток в северном направлении на расстоянии 23 км от берега, шириной 3 км с максимальной скоростью 6 см/с. С запада и востока от него преобладал обратный перенос с такими же скоростями. У крайней восточной стороны наблюдался слабый перенос вод на север со скоростью 0–3 см/с, которому соответствовала область со значениями солёности 12–12.5 е.п.с. (рис. 4).

На центральном разрезе (Б–Б) отмечены два участка с движением вод в направлении циклонической циркуляции, более интенсивный расположен в прибрежной части, занял всю водную толщу с максимальными скоростями более 6 см/с, в мористой части разреза в придонном горизонте

обнаружен заток со скоростью 3–6 см/с, соответствующий области с солёностью более 15 е.п.с. (рис. 4).

Западный разрез (В–В) представляет наибольший интерес, потому что он расположен ближе всего к Керченскому проливу, на нем зафиксированы наибольшие значения солёности на дне и, соответственно, наибольшие вертикальные градиенты солёности, кроме этого, инструментально измерен наибольший перепад скоростей течений в обе стороны относительно плоскости разреза. На большей его части наблюдался перенос вод на запад с максимальной скоростью более 18 см/с, данное значение зафиксировано в струе прибрежной части разреза, где получена солёность 12.5 е.п.с., поэтому можно утверждать, что в этой части доминирует пресный сток р. Кубань. В мористой части разреза, на расстоянии 20 км от берега, во всей водной толще доминирует перенос на запад со скоростью до 12 см/с, солёность составляет 14–15 е.п.с., что является типичным для азовоморского дрейфового переноса. В десяти км

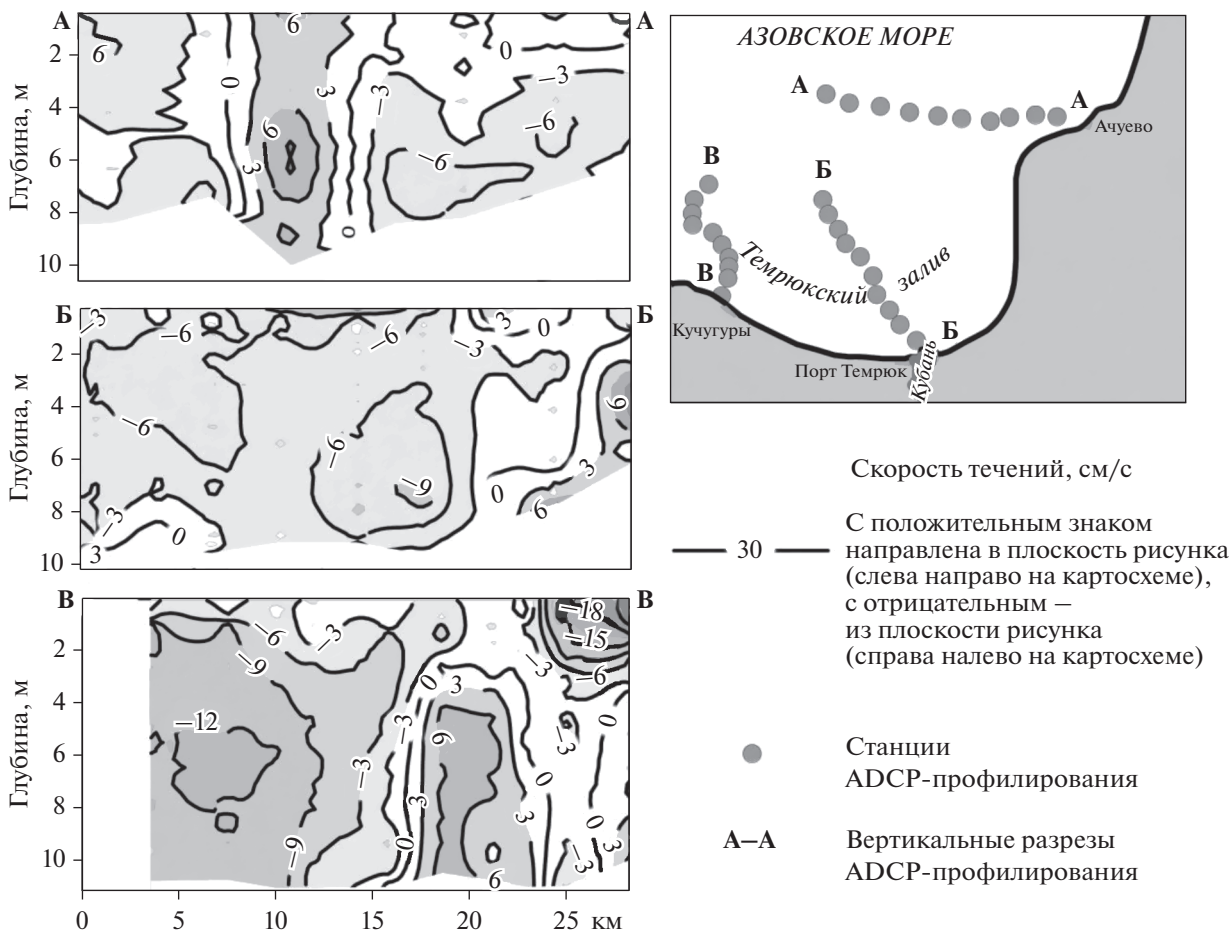


Рис. 5. Течения Темрюкского залива Азовского моря по данным судовых наблюдений НИС “Денеб” 21 июля 2019 г.

от берега обнаружена струя достаточно интенсивного течения на восток, максимумы скоростей в нем превышают 6 см/с, и его придонная часть соответствует областям с соленостью 15 е.п.с.

Чтобы выяснить, насколько затоки черноморских вод Темрюкского залива обеспечиваются за счет геострофического баланса течений, существующего за счет постоянного притока соленых вод через Керченский пролив, рассчитаны и построены разрезы динамических высот на основе данных STD-профилирования соответствующих разрезов (рис. 6). Наклоны изолиний на всех разрезах практически отсутствуют, за исключением части западного разреза, в области которого наблюдается интенсивный заток соленых вод Черного моря со скоростями до 6 см/с. Для этой части разреза с помощью динамического метода [3] рассчитана скорость геострофического течения, максимум которого достиг 0.6 см/с, соответственно, в условиях преобладания северного ветра, вклад геострофического баланса в систему течений юго-восточной части Азовского моря, наиболее подверженной влиянию черноморских вод, составляет всего 10%.

ОБСУЖДЕНИЕ

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.

Зависимость дрейфовых течений от изменчивости направления ветра не позволяет сформироваться постоянной циклонической циркуляции вод, это приводит к тому, что в безветренную летнюю погоду перемешивание снижается настолько, что в придонных слоях происходят заморы, но при усилении ветра толща перемешивается вплоть до взмучивания донных осадков.

В 2018 г. в период высокого стока Дона (1700 м³/с в ст. Раздорской) в Таганрогском заливе сформировался приустьевой фронт солености, расположенный в восточной части, центральная часть заполнилась перемешанными водами Дона и Азовского моря с вихреобразными участками пониженной и повышенной солености, в западной части залива наблюдался достаточно интенсив-

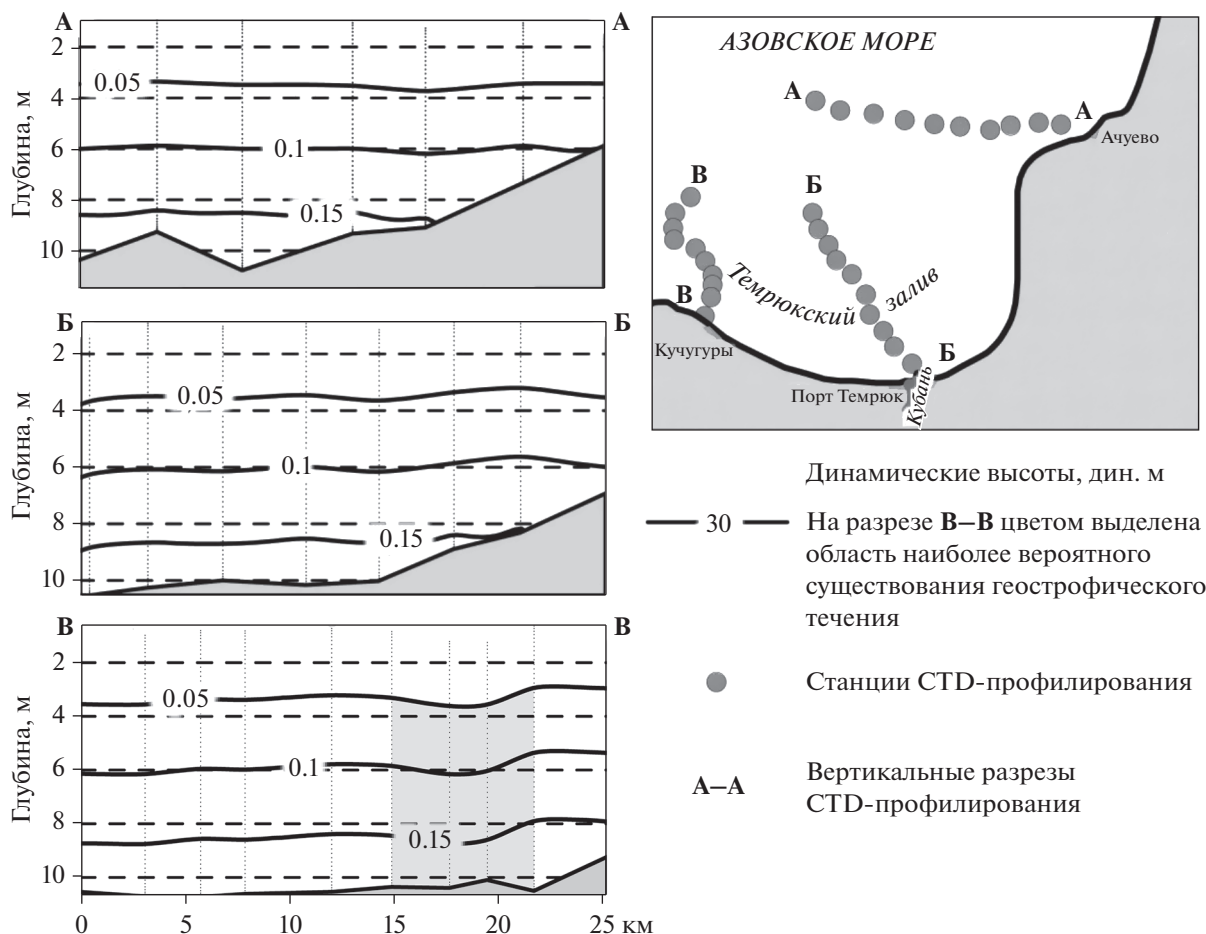


Рис. 6. Динамические высоты Темрюкского залива Азовского моря по данным судовых наблюдений НИС “Денеб” 21 июля 2019 г.

ный второй фронт солёности, разделивший перемешанные воды залива и солёные воды Азовского моря. Ежегодные наблюдения показывают, что при понижении пресного стока (менее 500 м³/с в ст. Раздорской) в первую очередь разрушается второй фронт солёности, при этом солёность плавно понижается вплоть до приустьевых фронтов, область, заполненная перемешанными водами, сокращается, пока не формируется одноступенчатая структура пресных речных вод и 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. 7 представлены наиболее характерные типы стратификации вод Таганрогского залива от устья Дона до косы Долгой (в качестве примеров взяты данные экспедиций 29.06–04.07.2001 г., 16–24.09.2005 г. и 20–28.08.2018 г.), либо до Сазальницкой косы (экспедиция 10–12.04.2012 г.). Построенные типы вертикального распределения солёности можно охарактеризовать как “нор-

мальный”, соответствующий типу стратификации, при котором изолинии солёности расположены последовательно, по возрастанию 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; “линзовидный” — соответствует условиям вихреобразного перемешивания, формирования линз пресных (речных), слабосоленых и солёных вод; “смешанный” — характеризует случаи, когда наблюдается как линзообразование, так и формирование слоев скачка солёности.

Маловодье Дона приводит к кардинальному перестроению термохалинной структуры Таганрогского залива, с 2012 г. в центральной части залива (район Сазальницкой косы) постоянно присутствуют высокосоленые (морские) воды, при этом случаев наблюдения “линзовидного” и “смешанного” типов стратификации становится меньше.

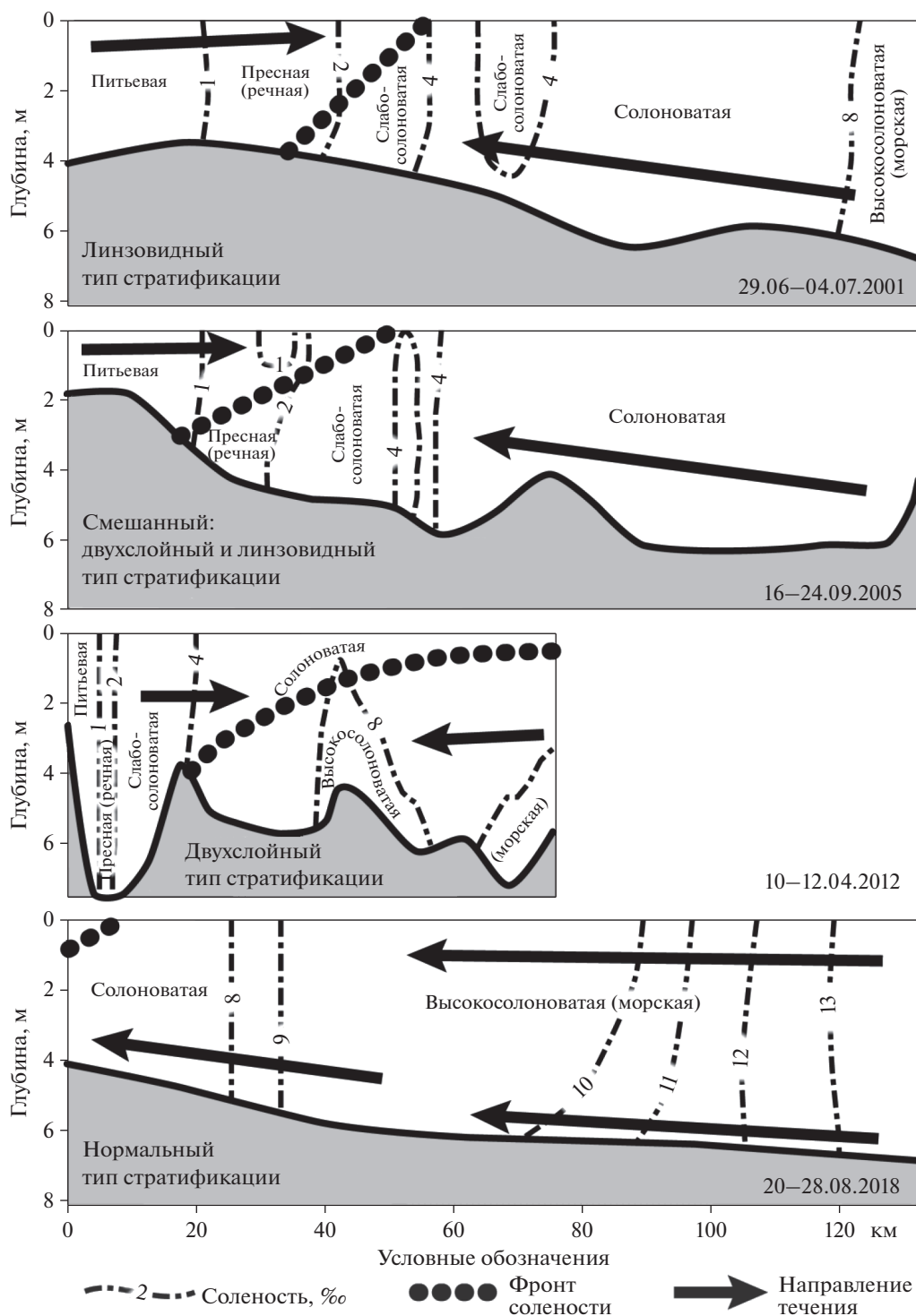


Рис. 7. Осолонение Таганрогского залива с 2001 по 2019 г. Классификация солености вод дана по [5].

Проведенный в работе анализ измерений вертикальной структуры течений Керченского пролива, полей течений Азовского моря, а также наиболее характерных типов стратификации вод Таганрогского залива позволяет предположить, что черноморская фауна, характерная для высо-

косолончатых (морских) вод, будет и дальше распространяться в Азовском море, занимая освобождающиеся экологические ниши.

Если в авандельте Дона часто наблюдаются слабосолончатые и солончатые воды (до 5–7 е.п.с.) [5], то в Таганрогском заливе с 2012 г. по-

стоянно присутствуют высокосолоноватые (морские) воды, с соленостью более 8 е.п.с. и до 13–14 е.п.с., что выше зоогеографического порога обитания местной азовоморской фауны.

ВЫВОДЫ

Измерения показывают исключительную метеозависимость структуры течений Керченского пролива, величины и скорости могут варьироваться в очень высоких пределах. Оценки затоков вод Черного моря могут быть в 30 раз больше, чем средние расходы Дона (400–500 м³/с) при южных ветрах, практически весь измерительный створ шириной 17 км могут заполнять воды северной составляющей течений со скоростями до 30 см/с, но структура вод Керченского пролива быстро перестраивается при изменении метеоусловий, и при северных ветрах обратный перенос вод в Черное море может быть в 5–6 раз выше, нежели в Азовское.

По сравнению с периодом повышенного стока Дона и распреснения моря 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 е.п.с. и течения восточного и северо-восточного направлений со скоростями 10–15 см/с, причем эти течения имеют частичную геострофическую природу, наверняка являются постоянными, не прекращаясь при северных ветрах и значительно усиливаясь при южных. Наблюдения за бентосными сообществами показывают, что в этой части Азовского моря уже сформировались устойчивые колонии видов, характерных для более соленого Черного моря, что говорит о долговременном присутствии черноморских вод в рассматриваемом районе [7].

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 Дона. На сегодняшний день важной является 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., а также продолжения мониторинга за площадью распространения чисто черноморских вод, для более точного описания гидрофизического состояния Азовского моря.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке Всероссийской организации “Русское географическое общество”, “Азовская комплексная экспедиция”, договор № 08/2019-И, проекта РФФИ № 18-29-05078 мк “Изучение воздействия организмов-деструкторов на металлы в зоне смешения речных и морских вод в широком диапазоне гидроклиматических условий” 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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В. Многолетнее изменение средней солености Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572.
3. Жуков Л.А. Общая океанология / Под ред. Дорониной Ю.П. Л.: Гидрометеиздат. 1976. 376 с.
4. Лемешко Е.М., Морозов А.Н., Федоров С.В. Исследования течений в Керченском проливе по данным акустического доплеровского профилометра течений (АДСР) // Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Сборник материалов III Всероссийской конференции. Ростов-на-Дону Изд-во Южного федерального университета, 2016. С. 213–228.
5. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. Причины осолонения Таганрогского залива // Докл. АН. 2017. Т. 477. № 1. 92–96.
6. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г. Новые представления циркуляции вод Азовского моря // Труды ЮНЦ РАН. Том 4: Моделирование и анализ гидрологических процессов в Азовском море. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 196–203.
7. Семин В.Л., Колочкина Г.А., Григоренко К.С. и др. Изменения донной фауны Азовского моря в условиях аномального осолонения // Труды VIII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)” Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”, 2020. Т. II(III). С. 490–494.
8. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.

Currents of the Azov Sea during the Don Lack of Water Period

G. G. Matishov^{a, b}, K. S. Grigorenko^{a, #}

^a*Southern Scientific Center RAS, Rostov-On-Don, Russia*

^b*Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS, Murmansk, Russia*

[#]*e-mail: klim_grig@mail.ru*

Based on marine observations onboard of the R/V *Deneb* in 2018 and 2019 water exchange between the Black and Azov seas is investigated. The investigations were carried out under different weather conditions, which led to a large scatter of the results. The north wind contributes to the formation of water transfer to the south 5–6 times higher than the transfer of water to the north, southern leads to the filling of the entire cross-section, 17 km wide, with waters, moving to the north and up to 30 times more than the average flow of the Don for the modern period of water scarcity. In this work, water circulation patterns of the Azov Sea on the surface and in the bottom horizons are constructed, confirming the drift scheme of water movement. The inflows of the Black Sea waters to the Temryuk Bay are described in detail. Based on the database of the SSC RAS, a classification of the types of stratification of the waters of the Taganrog Bay is constructed, four types are highlighted, 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