

УДК 551.465

ГИДРОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОД ФЕОДОСИЙСКОГО ЗАЛИВА В МАЕ 2015 г.

© 2017 г. А. С. Ижицкий, П. О. Завьялов

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия**e-mail: izh@ocean.ru, peter@ocean.ru*

Поступила в редакцию 18.10.2016 г.

После доработки 20.12.2016 г.

Распространение стока вод Азовского моря на шельфе крымского побережья и их проникновение в Феодосийский залив приводит к значительным изменениям гидрологической и гидрохимической структуры вод акватории, оценивается как один из основных источников антропогенного загрязнения. В то же время район Феодосийского залива является одним из наименее изученных районов российского побережья, с точки зрения структуры и динамики вод. В статье рассматривается гидрофизическое состояние вод Феодосийского залива и прилегающей части шельфа юго-восточного побережья Крымского полуострова. На основе данных натурных наблюдений, полученных в ходе экспедиции в мае 2015 г., выявлено присутствие вод азовоморского стока в заливе, установлены их термохалинные характеристики, описан характер распространения. Показано, что содержание этих вод в Феодосийском заливе может определяться не столько сезонным ходом стока в Керченском проливе, сколько динамическими процессами синоптического масштаба. Косвенно подтверждено представление о возможной ответственности азовоморского стока за частую генерацию прибрежных циклонических вихрей в исследуемом районе.

DOI: 10.7868/S0030157417040037

ВВЕДЕНИЕ

В прибрежных морских областях, находящихся в условиях существенного влияния материкового стока, развиваются разномасштабные процессы, вызванные взаимодействием различных по своим гидрофизическим и гидрохимическим характеристикам водных масс. Эти процессы в значительной степени определяют характер функционирования морских и береговых экосистем. В Черном море одной из таких зон является район юго-восточного побережья Крымского полуострова и акватория Феодосийского залива, находящиеся под значительным влиянием стока вод Азовского моря через Керченский пролив, создающего выраженную область опреснения [3]. Проникновение вод Азовского моря в Феодосийский залив приводит к значительным изменениям гидрологической и гидрохимической структуры вод акватории. Период максимального опреснения залива приходится на май–июнь [2]. При определенных метеорологических условиях соленость в заливе может падать до 13–14 епс [4].

Среднемноголетний объем поступающих в Черное море вод Азовского моря оценивается в 75 км³/год [5], причем максимум в годовом цикле отмечается в апреле–мае. Это – почти два стока Днепра и немногим менее половины

стока Дуная. Аналогия с материковым стоком усиливается формой Керченского пролива, очень похожего на впадающую в Черное море реку. Существенное отличие, однако, заключается в том, что сток через Керченский пролив попадает в черноморскую среду не пресным, а, ввиду трансформации изначально солоноватых вод Азовского моря в проливе, лишь на 2–3 епс менее соленым, чем окружающие воды Черного моря. Тем не менее, этот сток образует своего рода “плюм” достаточно крупного линейного масштаба, хорошо видимый на спутниковых изображениях (рис. 1а).

Наиболее вероятный сценарий “поведения” азовоморских вод после пересечения выходного створа пролива – довольно резкий поворот на запад и распространение в относительно узкой полосе вдоль побережья восточного Крыма в сторону Феодосийского залива и далее. Нередко наблюдается проникновение прижатых к берегу Основным черноморским течением (ОЧТ) азовоморских вод в Феодосийский залив, причем справа от стержня ОЧТ формируется антициклонический круговорот, часть которого захватывает акваторию залива [7]. Прибрежные антициклонические вихри в Черном море, как правило, образуются между стержнем ОЧТ и берегом, где вследствие бокового сдвига скорости существует зона антициклонической

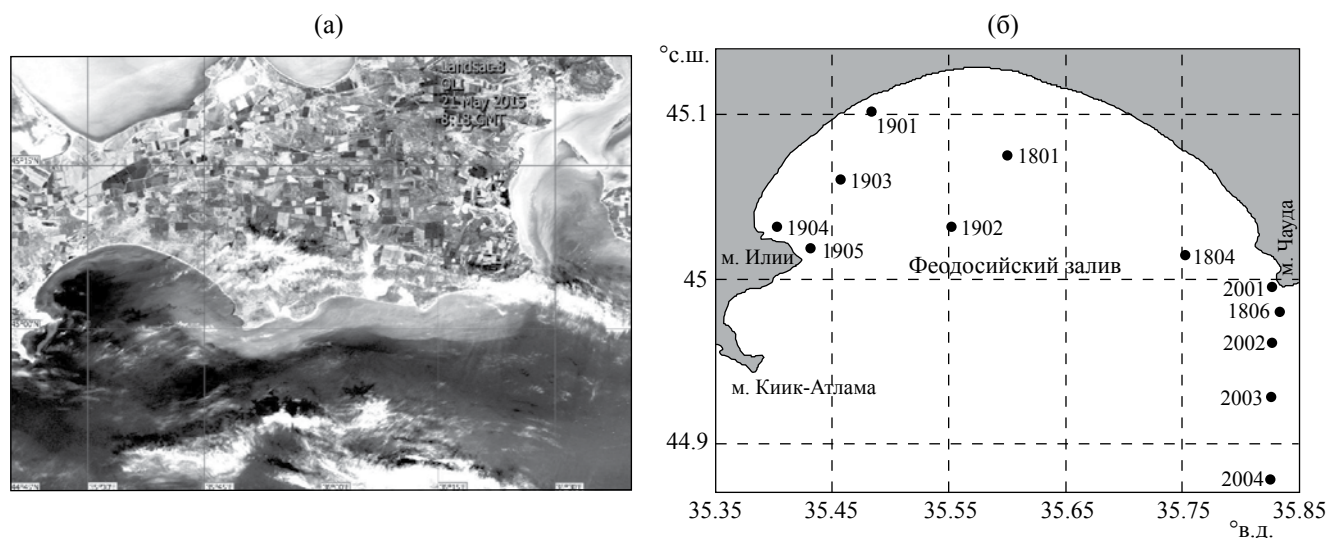


Рис. 1. Спутниковое изображение района работ от 21.05.2016 г. (а) – Схема расположения станций, выполненных в Феодосийском заливе и на прилегающем участке шельфа в ходе экспедиции 18–20.05.2016 г. (б).

завихренности поля течений [10, 11], однако для района Феодосийского залива и к востоку от него, где наряду с ОЧТ присутствует и стоковое течение из Керченского пролива, этот механизм генерации вихрей изучен недостаточно. По данным работы [6], основанной на спутниковых данных, как раз в этом районе часто наблюдаются не только антициклонические, но и циклонические прибрежные вихри. Предположительно, это может быть связано именно с циклоническим знаком сдвига скорости между стоковым течением и ОЧТ, однако эта гипотеза требует подтверждения данными измерений. Вместе с тем, антициклоническое движение вод по всей толще от поверхности до дна было зафиксировано в юго-западной части залива авторами работы [1] на основе данных STD-зондирования.

Следует отметить, что район Феодосийского залива является одним из наименее изученных районов российского побережья, с точки зрения структуры и динамики вод, так как он длительное время использовался как полигон военно-морских сил, что ограничивало возможность получения натуральных данных в экспедиционных исследованиях [7]. В то же время акватория Феодосийского залива, на берегах которого расположены крупные населенные пункты и рекреационные зоны, подвержена значительной антропогенной нагрузке. Согласно работе [9], акватория Феодосийского залива является наиболее загрязненным растворенными нефтепродуктами и растворенными органическими веществами районом крымского побережья. Авторы работы [8] указывают на превышения

ПДК по концентрациям мышьяка, цинка, свинца, меди и стронция в заливе. Для этого района существуют два основных источника загрязнения: (1) постоянно действующий внутренний источник – Феодосийский порт с нефтебазой, вблизи которого были обнаружены максимальные концентрации тяжелых металлов, а концентрация растворенных нефтепродуктов в 12–19 раз превышала условную норму; (2) удаленный внешний источник, связанный с адвекцией в пределы акватории залива загрязненных вод из промышленных районов, находящихся на берегах Азовского моря и Керченского пролива [9].

В предлагаемой статье представлены результаты натуральных наблюдений гидрологической структуры вод Феодосийского залива и прилегающего участка шельфа, полученные в ходе экспедиции Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН) в мае 2015 г. Предметом обсуждения являются физические процессы, определяющие распространение азовоморских вод в Черном море, а также сравнение вновь полученных данных с результатами выполненных ранее аналогичных исследований.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ

Измерения были организованы в форме трех однодневных выходов 18, 19 и 20 мая 2015 г. в акватории Феодосийского залива, а также на участке шельфа юго-восточного побережья Крымского полуострова (рис. 1б). Работы проводились с борта судна БПМ-74 “Ашамба” ИО РАН. В общей

сложности были выполнены 12 гидрологических станций в диапазоне глубин моря от 13 до 50 м, в том числе нормальный берегу разрез протяженностью около 12 км в районе мыса Чауда, состоявший из четырех станций.

На каждой станции выполнялись вертикальные STD-зондирования водной толщи от поверхности до дна с помощью зонда SBE SeaCat19plus с фиксированной дискретностью измерений 4 Гц. Кроме того, были выполнены измерения скорости и направления морских течений на разрезе от м. Чауда. Измерения проводились во время выхода 20 мая на 4-х станциях разреза с использованием закрепленного на специальном плоту акустического доплеровского измерителя течений RDI RioGrande. В ходе работ на станции плот с закрепленным прибором спускался на воду, отводился от борта судна на максимально возможное расстояние (15–20 м) и выдерживался в таком положении в течение 4–8 минут. Фиксация направлений и скорости морских течений производилась с установленным размером ячейки 1 м. Вертикальные распределения компонент скорости течения на каждой из станций были построены по осредненным сериям ансамблей записи прибора (от 30 до 55 ансамблей).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Термохалинная структура. В центральной и западной частях залива наблюдалась относительно

однородная структура вод при значениях солености около 18.2 епс (рис. 2). Вертикальное распределение температуры в этих районах характеризовалось наличием верхнего теплого слоя с максимальными значениями от 16.2 до 12.5 °С у поверхности и убыванием до 10 °С ко дну. В восточной части залива и прилегающем участке шельфа вертикальные градиенты температуры и солености выражены ярче, а значения температуры (до 16 °С на станции 2004) в восточной части залива выше, чем в центральной и западной частях. Наблюдаемая “двухслойная” вертикальная структура водной колонны с выраженным опресненным приповерхностным слоем и скачком температуры и солености на его нижней границе вообще характерна для прибрежных районов, находящаяся в условиях воздействия материкового стока.

На рис. 3 представлены распределения температуры T и солености S на нормальном берегу разрезе, выполненном на юг от м. Чауда. Разрез пересекал предполагаемую зону распространения трансформированного азовоморского стока на участке шельфа к востоку от Феодосийского залива. Действительно, на разрезе хорошо виден приповерхностный слой пониженной солености (менее 18 епс) и повышенной температуры (более 15.5 °С), достигающий глубин 10–15 м. “Ядро” этого слоя можно отнести к станции 2003

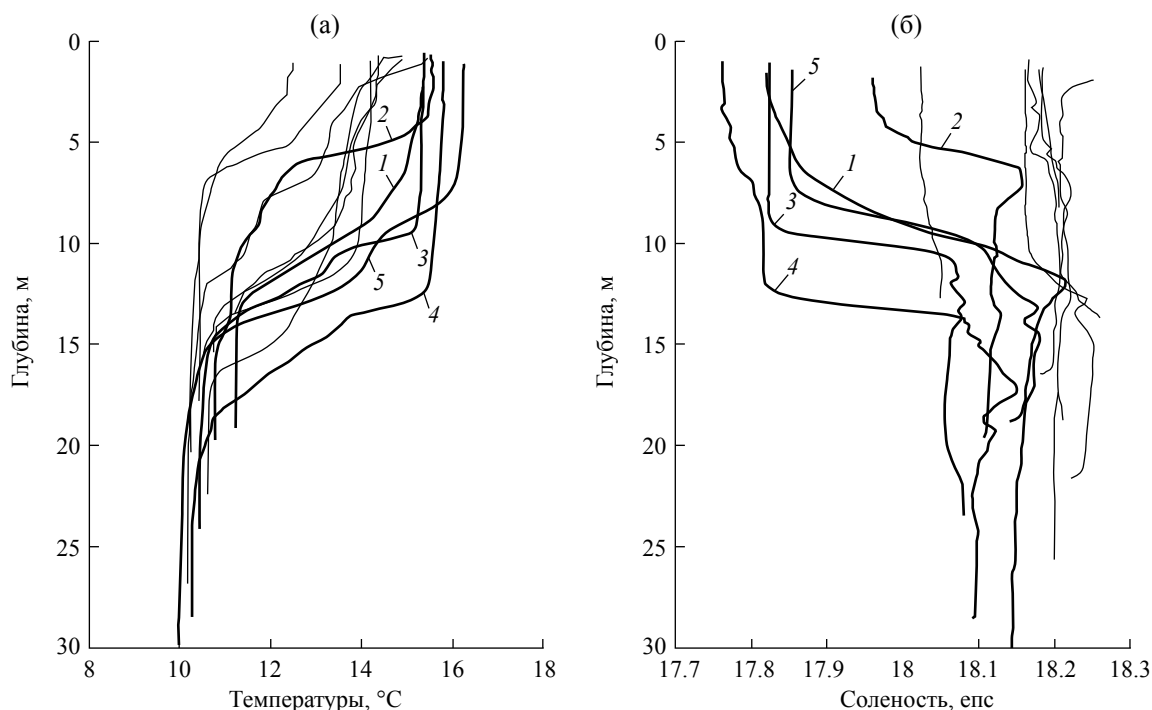


Рис. 2. Вертикальные профили температуры (а) и солености (б) в Феодосийском заливе по результатам STD-зондирования 18–20.05.2015 г. Цифрами обозначены станции: 1–1804, 2–1806, 3–2002, 4–2003, 5–2004.

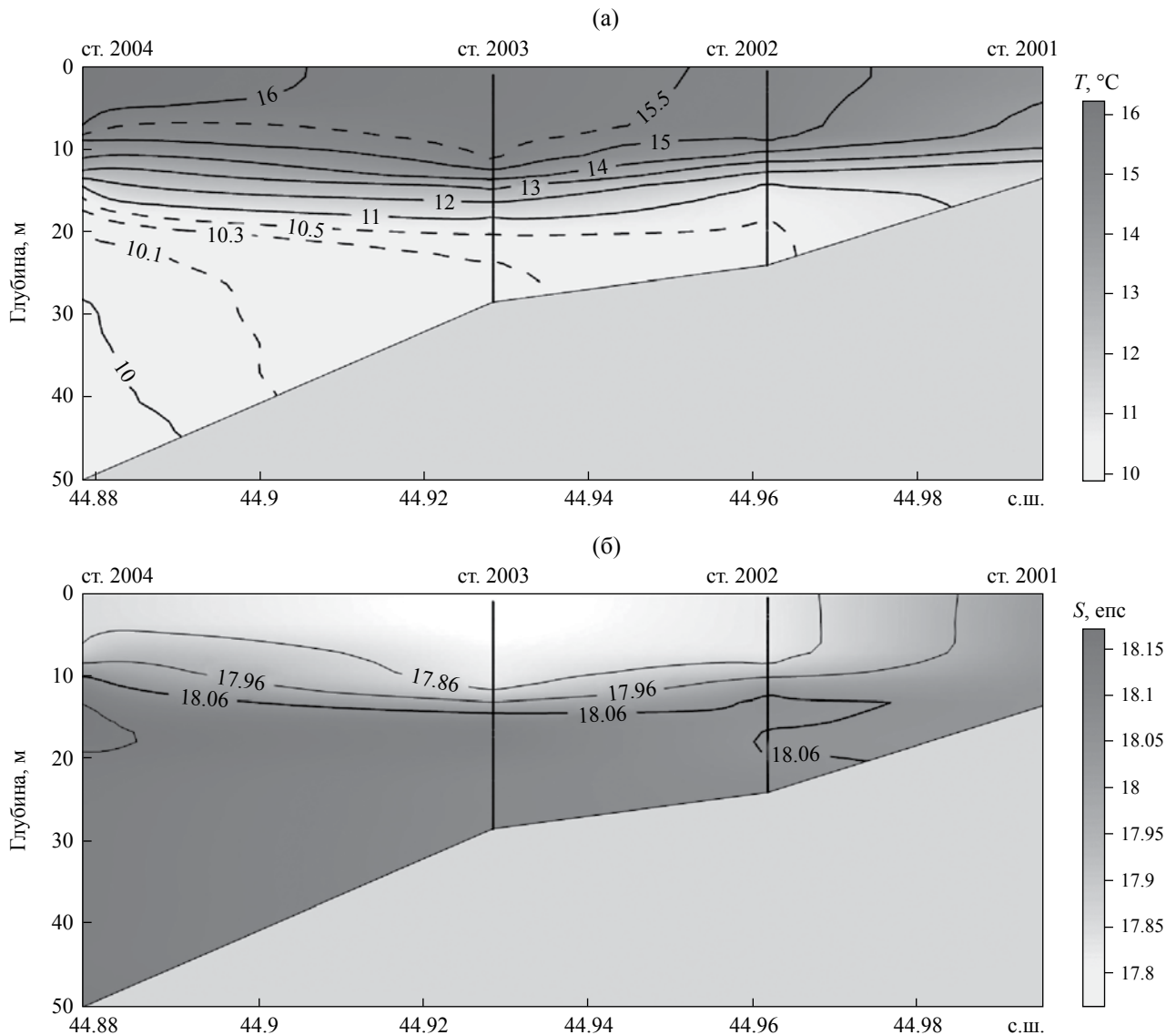


Рис. 3. Вертикальные распределения температуры (а) и солёности (б) на нормальном берегу разрезе от м. Чауда 20.05.2015.

на удалении приблизительно 7.5 км от берега, где приповерхностный слой имел наибольшую толщину, причем отсюда по направлениям и к берегу, и от берега солёность росла.

На основе анализа T , S -кривых для вод Феодосийского залива и прилегающей шельфовой зоны (рис. 4) можно выделить основные типы вод, формировавших гидрологическую структуру района исследований в период наблюдений. В работе [4] солёность черноморской поверхностной водной массы определяется в пределах от 18 до 18.4 епс, в то время как воды с солёностью 17.8 епс и ниже отнесены к черноморской прибрежной водной массе. В соответствии с этим, западная и центральная часть Феодосийского залива (рис. 4, значения S выше

18 епс) в период экспедиции были заняты черноморской поверхностной водной массой. В то же время поверхностный слой восточной части залива и прилегающего участка шельфа был занят трансформированной прибрежной водной массой (рис. 4, значения S ниже 18 епс), основным источником которой на Керченско-Таманском шельфе является азовоморский сток. Обобщая приведенные выше рассуждения, можно сказать, что в период проведения измерений область наиболее интенсивного распространения трансформированного азовоморского стока находилась на шельфе восточнее Феодосийского залива в полосе, ограниченной изобатами 25 и 35 м. Зарегистрирован также заток этих вод в восточную часть Феодосийского залива, что

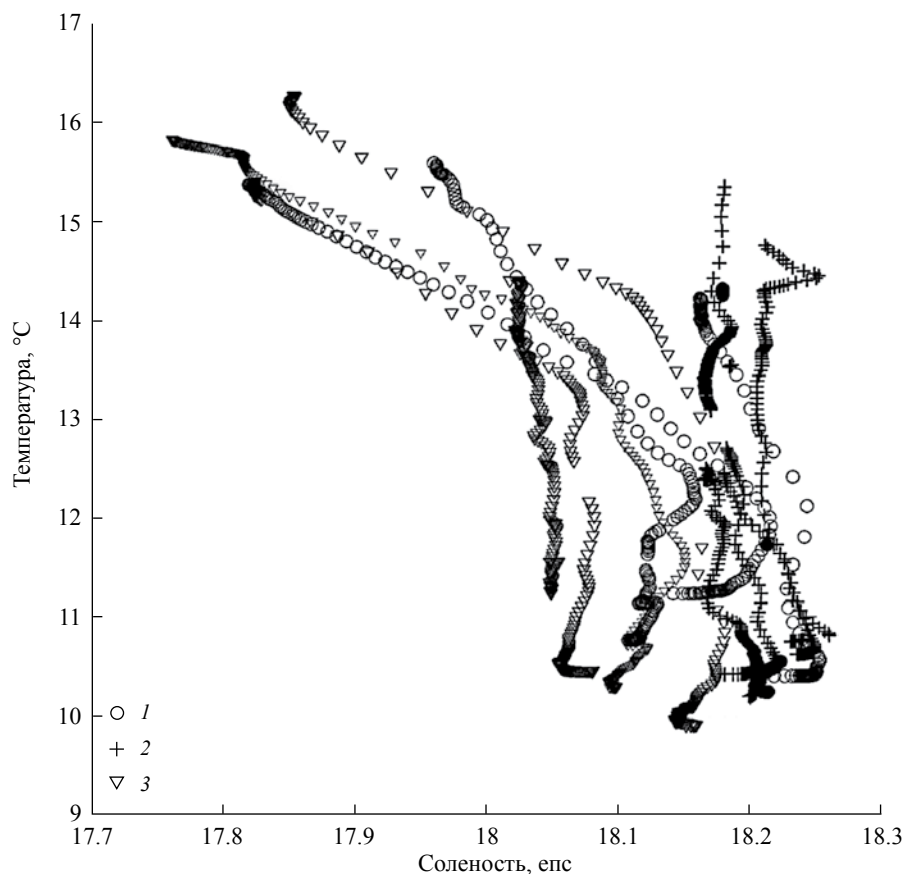


Рис. 4. *T, S*-кривые вод Феодосийского залива и прилегающего участка шельфа по данным вертикального STD-зондирования на станциях. 1 – восточная часть залива 18.05.2017, 2 – западная и центральная части залива 19.05.2015, 3 – разрез от м. Чауда 20.05.2017.

привело к формированию заметных горизонтальных градиентов солёности и температуры в поверхностном слое акватории последнего.

Описанная выше гидрологическая структура вод Феодосийского залива имеет сходства и отличия от другого описанного в литературе случая проникновения азовоморских вод в залив зимой 2006–2007 гг. [7]. В обоих случаях в водах залива (преимущественно в восточной его части) формировался выраженный поверхностный слой пониженной солёности. Однако, если в декабре 2006 г. разница в величинах солёности между водами двух типов превышала 2 епс [7], то в мае 2015 г. она составила лишь десятые доли епс. Вертикальное распределение температуры в заливе в декабре 2006 г. характеризовалось наличием слоя пониженных значений в поверхностных водах мощностью от 5 до 15 м [7] и инверсией температуры в нижележащем слое. В мае 2015 г., наоборот, в верхнем перемешанном слое отмечен максимум температуры (рис. 2а). Это должно быть связано с тем, что в декабре воды в мелком Азовском

море и Керченском проливе холоднее черноморских, а в мае – теплее. Следует иметь в виду, что, согласно климатическим данным, наибольший сток из Керченского пролива отмечается в мае–июне, а не зимой. Таким образом, по-видимому, содержание азовоморских вод в Феодосийском заливе определяется не столько сезонным циклом стока, сколько динамическими процессами синоптического масштаба, положением стокового течения относительно берега и степенью его проникновения в акваторию залива.

Циркуляция вод. По данным съёмки профилографом ADCP, на разрезе от м. Чауда наблюдалось общее движение водных масс в целом с востока на запад (рис. 5). Вдольбереговая (зональная) компонента скорости течения была во всех случаях направлена на запад и достигала значений 43 см/с, а поперечная берегу (меридиональная) компонента менялась в пределах от –9 до 22 см/с. В структуре течений на разрезе следует отметить наличие выраженного приповерхностного 10–15-метрового слоя, для которого

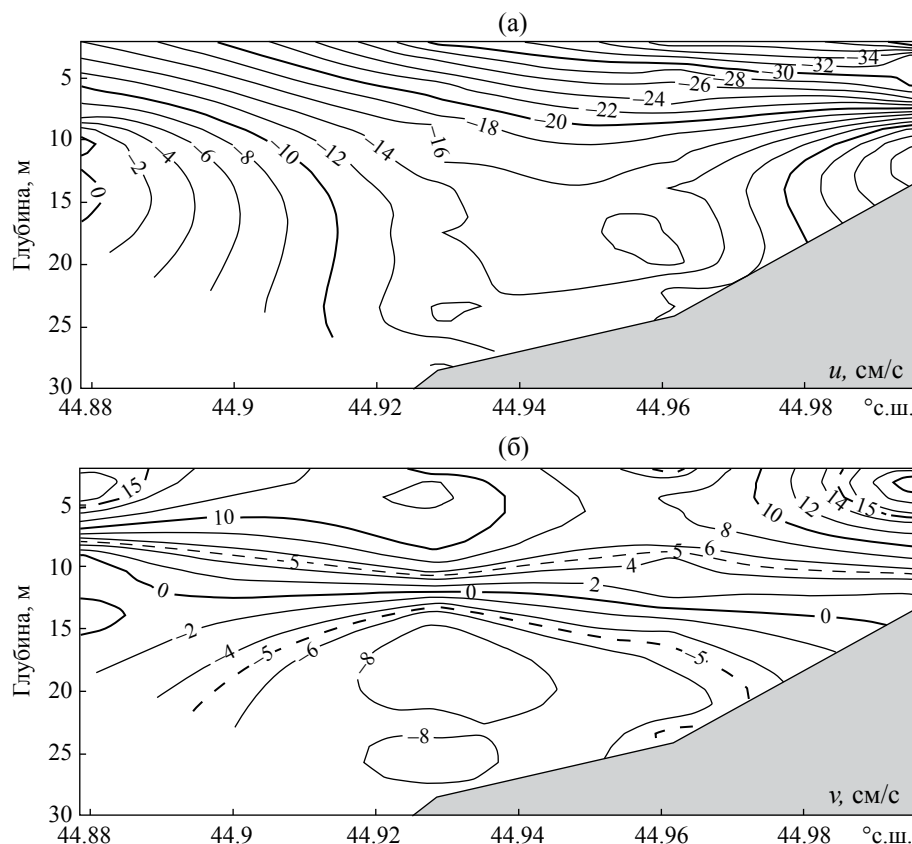


Рис. 5. Вертикальное распределение величин зональной (а) и меридиональной (б) компонент скорости течения по данным измерений с помощью профилографа ADCP на меридиональном разрезе от м. Чауда (20.05.2015 г.).

характерны наиболее высокие скорости течения в целом, а меридиональная компонента меняет знак на нижней границе этого слоя. Таким образом, общий перенос в пределах выделенного слоя был направлен в Феодосийский залив, в то время как в слоях водной толщи, располагавшихся ниже нулевой изотакхи v перенос был направлен в сторону открытого моря. Согласно описанным выше результатам STD-зондирований, расположение скачка плотности приблизительно соответствует как раз положению нулевой изотакхи меридиональной компоненты течения. Таким образом, данные измерений скорости течения согласуются с представлением о трансформированных азовоморских водах, проникающих в Феодосийский залив в верхнем 15-метровом слое моря.

По данным STD-зондирований мы также рассчитали геострофические скорости течения на разрезе от м. Чауда относительно горизонта 13 м. Наблюдавшийся характер распределения величины плотности на разрезе (рис. 6а) указывает на существование двух разнонаправленных

геострофических потоков в приповерхностном слое (рис. 6б). Геострофическая скорость в части поверхностного слоя в пределах от берега до изобат 30–35 м (то есть примерно до оси стокового течения) была направлена с востока на запад, но разворачивалась в обратном направлении мористее данного участка, что говорит о циклоническом характере общей завихренности южнее оси стокового течения. Прямые измерения скорости течений, по-видимому, это подтверждают (рис. 7) – скорость вдольберегового течения сперва возрастает при удалении от берега, достигая максимальных значений на расстоянии около 4 км от последнего, а затем уменьшается в сторону континентального склона, образуя сдвиг циклонического знака.

ВЫВОДЫ

На основе данных натуральных наблюдений зарегистрировано присутствие трансформированных вод Азовского моря в акватории Феодосийского залива и на прилегающем участке шельфа

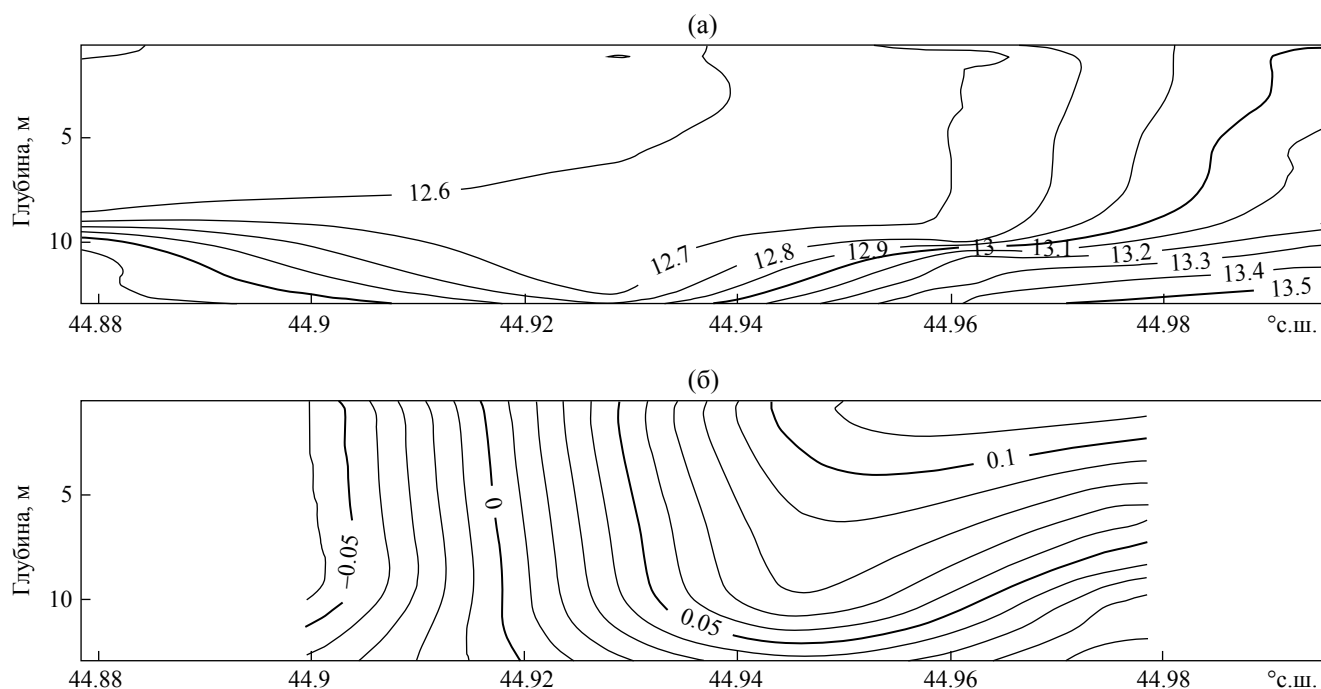


Рис. 6. Вертикальное распределение величин условной плотности (кг/м^3) (а) и геострофической компоненты зональной скорости течения (м/с) (б) от поверхности до глубины 13 м на меридиональном разрезе от м. Чауда (20.05.2015 г.).

к востоку от залива в мае 2015 г. Присутствие этих вод было локализовано в верхнем 15-метровом слое моря в полосе, ось которой располагалась на удалении 7–8 км от берега восточнее Феодосийского залива, а также в восточном секторе самого залива. Несмотря на сезон максимального стока через Керченский пролив, термохалинные проявления вод азовоморского происхождения в районе исследования оказались менее выраженными, чем это отмечалось зимой 2006 г. в ранее опубликованном в литературе подробном исследовании распространения азовоморских вод в районе Феодосийского залива. Можно сделать вывод о том, что содержание этих вод в Феодосийском заливе определяется не столько сезонным ходом стока, сколько динамическими процессами синоптического масштаба. Прямые измерения скорости течений, а также геострофические оценки говорят о существовании переносящего азовоморские воды струйного вдольберегового течения западного направления в верхнем 15-метровом слое, причем это течение, по крайней мере в период измерений, по-видимому, “обгоняло” ОЧТ – на его южной периферии отмечен циклонический сдвиг скорости. Таким образом, косвенно подтверждается представление о возможной ответственности азовоморского стока за частую генерацию прибрежных циклонических вихрей в этом районе. Однако более аккуратный анализ

и основательное подтверждение этой гипотезы потребуют более долгосрочных измерений.

Авторы благодарят всех участников экспедиции за помощь в проведении измерений, а также коллег из Южного Отделения ИО РАН С. Б. Куклева и В. И. Баранова за предоставленный профилограф ADCP.

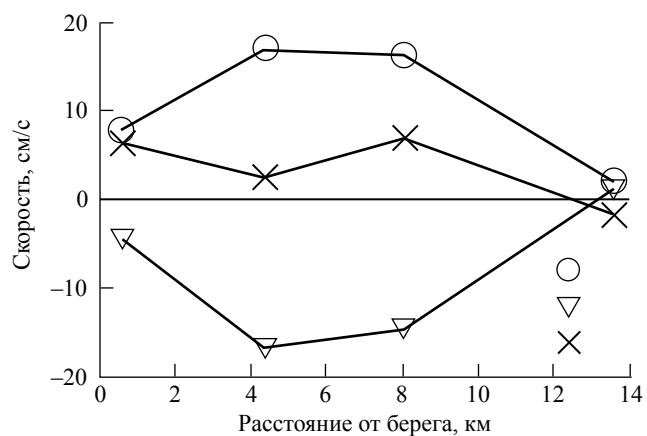


Рис. 7. Значения модуля скорости течения (кружки) и ее зональной (треугольники, положительное направление – восток) и меридиональной (крестики, положительное направление – север) компонент на глубине 10 м в зависимости от расстояния от берега по данным измерений с помощью профилографа ADCP на меридиональном разрезе от м. Чауда (20.05.2015 г.).

Работа поддержана Министерством образования и науки (соглашение 14.613.21.0050, код RFMEFI61315X0050).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баханов В.В., Горячкин Ю.Н., Корчагин Н.Н., Репина И.А. Экспедиция в Черном море в регионе Феодосийского залива в августе–сентябре 2002 года // *Океанология*. 2005. Т. 45. № 4. С. 634–638.
2. Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Изменчивость солёности поверхностных вод в прибрежной зоне Южного берега Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2005. Вып. 12. С. 21–27.
3. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
4. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. 212 с.
5. Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1: Азовское море. Севастополь: МЧС и НАН Украины, Морское отд. УкрНИГМИ, 2009. 400 с.
6. Каримова С.С. Исследование нестационарных вихревых структур Черного моря по данным инфракрасных и оптических изображений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 4. С. 228–244.
7. Кондратьев С.И. Изменения в гидрохимическом составе вод Феодосийского залива в результате проникновения азовоморских вод зимой 2006–2007 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2009. Вып. 18. С. 30–38.
8. Котельянец Е.А., Коновалов С.К. Распределение тяжелых металлов в донных отложениях Феодосийского залива // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2008. Вып. 17. С. 171–175.
9. Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Оценка концентрации растворённых нефтепродуктов в прибрежных водах Крыма на основе данных оптических измерений // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа*. 2006. Вып. 14. С. 245–258.
10. Тимов В.Б. Морфометрические параметры и гидрофизические характеристики прибрежных антициклонических вихрей в Черном море // *Метеорология и гидрология*. 2002. № 4. С. 67–73.
11. Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al. Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108 (C8). 3246.

Hydrophysical State of the Gulf of Feodosia in May, 2015

A. S. Izhitskiy, P. O. Zavalov

Distribution of the Azov Sea water on the Crimean shelf and its penetration to the Gulf of Feodosia result in significant changes in the hydrophysical and hydrochemical structure of the water area. This inflow is also estimated as one of the major sources of the anthropogenic pollution in the region. At the same time, Feodosia Gulf is one of the least investigated areas of Russian Black Sea coast. The paper is focused on the hydrophysical structure of the Gulf of Feodosia and south-eastern part of the Crimea shelf. Results of the field survey of May, 2015 allowed to reveal the presence of the Azov Sea water in the gulf and to describe its thermohaline properties along with the character of distribution. It is shown that the contamination of the Azov Sea water in the gulf could mostly be determined by the synoptic dynamical processes in the area rather than the seasonal variability of the discharge in the Kerch strait. Possible influence of the Azov Sea water distribution on the formation of the cyclonic gyres in the coastal area of the region is indirectly confirmed by *in situ* measurements.