

Мраморноморские воды средиземноморского происхождения в формировании полей солёности и динамики в Черном море

О. Р. Андрианова, Р. Р. Белевич, М. И. Скипа, 2019

ГУ "Отделение гидроакустики Института геофизики НАН Украины",
Одесса, Украина

Поступила 10 июля 2019 г.

Уточнено особливості дна центральної улоговини Чорного моря та вперше виділено чотири зонально розташовані депресії з максимальними глибинами 2170, 2210, 2171 і 2140 м, а також встановлено положення осередків максимальної солоності у товщі вод Чорного моря у багаторічному кліматичному плані. В полі фактичної середньорічної солоності у центральній улоговині моря виділено три осередки максимальної солоності, які приурочені до депресій дна, та два подібні осередки в усій товщі вод у південно-західному (прибосфорському) і південно-східному (Батумі-Трабзонському) прибережних районах моря. У полях екстремумів солоності виявлено чотири осередки максимуму солоності в центральній улоговині моря та два у південно-західному і південно-східному районах моря. Природу їх виникнення та постійного існування пояснено надходженням у придонні шари Чорного моря високосолюних мраморноморських вод середземноморського походження та подальшою їх інтрузією з глибин до поверхні, оскільки інших джерел надходження у море високосолюних вод немає. Висхідні вертикальні рухи, що виникають при інтрузії вод з глибин у верхні шари, за взаємодії із силою Коріоліса спричинюють утворення в куполах високої солоності горизонтальної циркуляції циклонічного характеру. Цей процес поширюється та існує в усій товщі вод. У вертикальному розподілі середньої та екстремальної солоності встановлено відмінності. На кривих екстремумів солоності простежено добре виражені порушення, зумовлені процесами перемішування вод: у полі мінімальної солоності вони розміщуються на горизонтах від 300 до 1200 м з формуванням навіть однорідного шару води на глибинах 500—600 м; у полі максимальної солоності виділено різке зменшення градієнта на горизонті 400—500 м, а також формування однорідного шару води на глибинах 800—1000 м.

Ключові слова: середньорічна, максимальна, мінімальна солоність, інтрузії, купола, осередки, перемішування вод, циркуляція.

Введение. Вопросам исследования характера водообмена Черного моря с Мраморным, а также особенностям поступления, дальнейшего распространения и трансформации средиземноморских вод на прибосфорском шельфе посвящено много работ [Зубов, 1956; Богданова, 1969, 1972; Суховой, 1986, 2012; Горячкин, Иванов, 2006; Иванов, Белокопытов, 2011]. И хотя прямых измерений течений в самом проливе

проведено недостаточно, общее представление о характере водообмена через пролив и особенностях гидрофизических процессов, происходящих в прибосфорском районе, уже можно считать сформированным.

Пролив Босфор, соединяющий Мраморное море с Черным, представляет собой узкий (минимальная ширина 0,7 км) мелкий (средняя глубина 65 м, на пороге у

26 км — 36 м) и длинный (около 33 км) извилистый желоб.

Главной морфометрической чертой Черного моря является сочетание обширной глубоководной котловины с глубинами свыше 2000 м с крутыми склонами почти без шельфа и значительного мелководья с глубинами 50—100 м в его северо-западной части. В настоящее время сложилась относительно постоянная стабильность в солевом бюджете Черного моря, что объясняется сбалансированными поступлением солей в море с нижнебосфорским течением (до 38 ‰) и выносом из моря распресненных вод верхнебосфорским потоком (17,5—18,3 ‰) [Иванов, Белокопытов, 2011]. Высокосоленые мраморноморские воды средиземноморского происхождения, поступив на прибосфорский шельф и частично трансформируясь, стекают в виде "языков" или "разветвленной дельты" (зачастую толщиной не более 2—4 м) по наиболее низким местам к свалу глубин и далее интрузионно опускаются ко дну моря, занимая там наиболее глубокие его впадины. Принято считать, что ежегодно с нижнебосфорским течением в Черное море из Мраморного вносится в среднем 184 км³ масс воды с температурой от 9 до 15 °С и соленостью от 34 до 38‰. Верхнебосфорским течением ежегодно в Мраморное выносятся в среднем 384 км³ масс черноморской воды с температурой от 6 до 24 °С и соленостью от 17,5 до 18,3 ‰ [Иванов, Белокопытов, 2011]. В недавней публикации по балансовым расчетам [Богуславский и др., 2006] и в последних исследованиях турецких ученых [Falina et al., 2017] отмечена высокая вероятность больших (примерно в 2 раза) средних расходов ниже- и верхнебосфорского потоков соответственно 300 и 600 км³ в год.

Дальнейшими исследованиями процессов трансформации и внедрения из придонных горизонтов в вышележащие слои высокосоленых вод установлено, что вследствие непрерывного и постоянно происходящего обновления свежими порциями вод, поступающими из пролива в придонные слои моря, "старые" воды, уже несколь-

ко понизившие свою плотность, вынуждены интрузионно подниматься. Этот процесс протекает непрерывно и приводит к распространению более соленых вод вверх от горизонта к горизонту вплоть до поверхности или до глубины, где происходит выравнивание их плотности с плотностью окружающих вод. В итоге восходящие движения, взаимодействуя с силой Кориолиса, приводят к образованию в куполах высокой солености горизонтальной циркуляции циклонического характера. Развитие динамических процессов во всей толще вод приводит к необычному (аномальному) явлению, когда в центре моря из глубин поднимаются плотные высокосоленые воды, а на периферии опускаются вглубь менее плотные. Такие же выводы делают также авторы карт плотности морской воды в текстовом приложении к ним [Океанографічний ..., 2009]. В формировании общей циклонической циркуляции вод Черного моря и при оценке особенностей распределения поля солености на его акватории описанный процесс, по нашему мнению, является определяющим и лежит в основе исследований интрузионных вторжений средиземноморских вод.

Целью исследования являлось выделение на картах положения центров куполов повышенной солености на горизонтах 1500 и 2000 м по максимумам солености в водах придонных депрессий центральной котловины Черного моря. Предполагается, что эти купола сформировались в результате заполнения указанных форм рельефа дна высокосолеными мраморноморскими водами средиземноморского происхождения.

Материалы и методология исследования. Для оценки путей дальнейшей трансформации плотных высокосоленых средиземноморских вод, поступивших через пролив Босфор в Черное море, были построены карты распределения фактической среднегодовой многолетней солености воды и выявлены на них ее максимальные значения по горизонтам на основании обобщения 5350 океанографических стан-

ций за период с 1903 по 1982 г. из справочного пособия [Статистические ..., 1987]. В нем приведены данные на стандартных горизонтах акватории Черного моря по 95 квадратам размером 40' по широте и 60' по долготе. Для слоя 0—50 м в каждом квадрате приведены данные о солености и температуре воды с месячной дискретностью; для слоя 75—500 м дискретность составляла один сезон; для слоя 600—2000 м — 1 год.

Методология самой работы состояла в выборке из полей фактической среднегодовой многолетней солености воды и полей ее экстремальных значений (max и min) на 13 горизонтах 0, 100, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500 и 2000 м данных, необходимых для последующего построения карт этой характеристики на всех горизонтах. При этом для получения среднегодовой величины солености предварительно понадобилось провести на горизонте 0 м среднемесячное, а на горизонтах от 100 до 500 м — сезонное осреднение данных солености. После этого стало возможным построение карты среднегодового распределения на акватории моря анализируемых характеристик с выделением на них положения точек (квадратов) с максимальными их значениями.

На основании среднемноголетних полей солености (фактической, а также экстремальных ее значений) [Статистические ..., 1987] на стандартных горизонтах всей толщи вод в придонном слое моря были выделены районы или очаги, куда опускаются и где располагаются воды с наиболее высокими ее значениями (нижний горизонт наблюдений 2000 м). В дальнейшем анализировались интрузии и оценивался характер трансформации выявленных в придонном слое (на глубине 2000 м) высокосолёных вод, а также их взаимодействие с вышележащими менее солёными водами.

К глубоководным котловинам Черного моря были отнесены зоны ниже 2000 м. На рис. 1 показана карта рельефа дна центральной котловины моря, подробно освещающая глубины дна более 2000 м

(с изобатами через 30 м) по сравнению с батиметрической картой из недавно опубликованной работы [Иванов, Белокопытов, 2011] с изобатами через 200 м (врезка). На построенной карте (см. рис. 1) можно увидеть существование четырех впадин со значениями минимальных глубин. Вместе с тем данные наблюдений в придонном слое моря на глубине 2000 м характеризовались всего лишь 19 точками и, естественно, не могли описать всю котловину дна моря. Координаты центров выделенных депрессий (впадин), куда прежде всего должны попадать плотные и высокосолёные воды средиземноморского происхождения, следующие: 2170 м — 42° 30' с. ш., 31° 07' в. д.; 2210 м — 43° 00' с. ш., 33° 12' в. д.; 2171 м — 43° 17' с. ш., 37° 06' в. д.; 2140 м — 43° 13' с. ш., 38° 05' в. д.

Результаты исследований и их анализ.

Ввиду значительной зональной вытянутости самого Черного моря и депрессий на его дне (между 42,3° и 43,3° с. ш.) анализ пространственного положения очагов максимальной солености осуществлялся по изменению лишь их долготного положения. В глубоководной котловине дна открытой части моря на горизонте 2000 м было выявлено два района с максимальными значениями солености воды. Первый из них располагался на 43,3° с. ш. и 35,5° в. д. с соленостью 22,355 ‰, а второй — на 43,0° с. ш. и 39,0° в. д. с соленостью 22,39 ‰. Кроме того, на этом же горизонте было обнаружено еще два района с подобными максимумами солености. Располагались они соответственно в юго-западных и юго-восточных прибрежных частях моря, прилегающих условно к прибосфорскому и Батуми-Трабзонскому районам. Их положение и параметры: первого 42,33° с. ш. и 30,0° в. д. — соленость 22,36 ‰, а второго 42,33° с. ш. и 39,0° в. д. — соленость 22,40 ‰.

Ввиду недостаточной освещенности данными о солености горизонта 2000 м они были дополнены аналогичными сведениями, снятыми с карты для горизонта 1500 м, учитывая их квазиоднородность как установленную нами в придонном 500-мет-

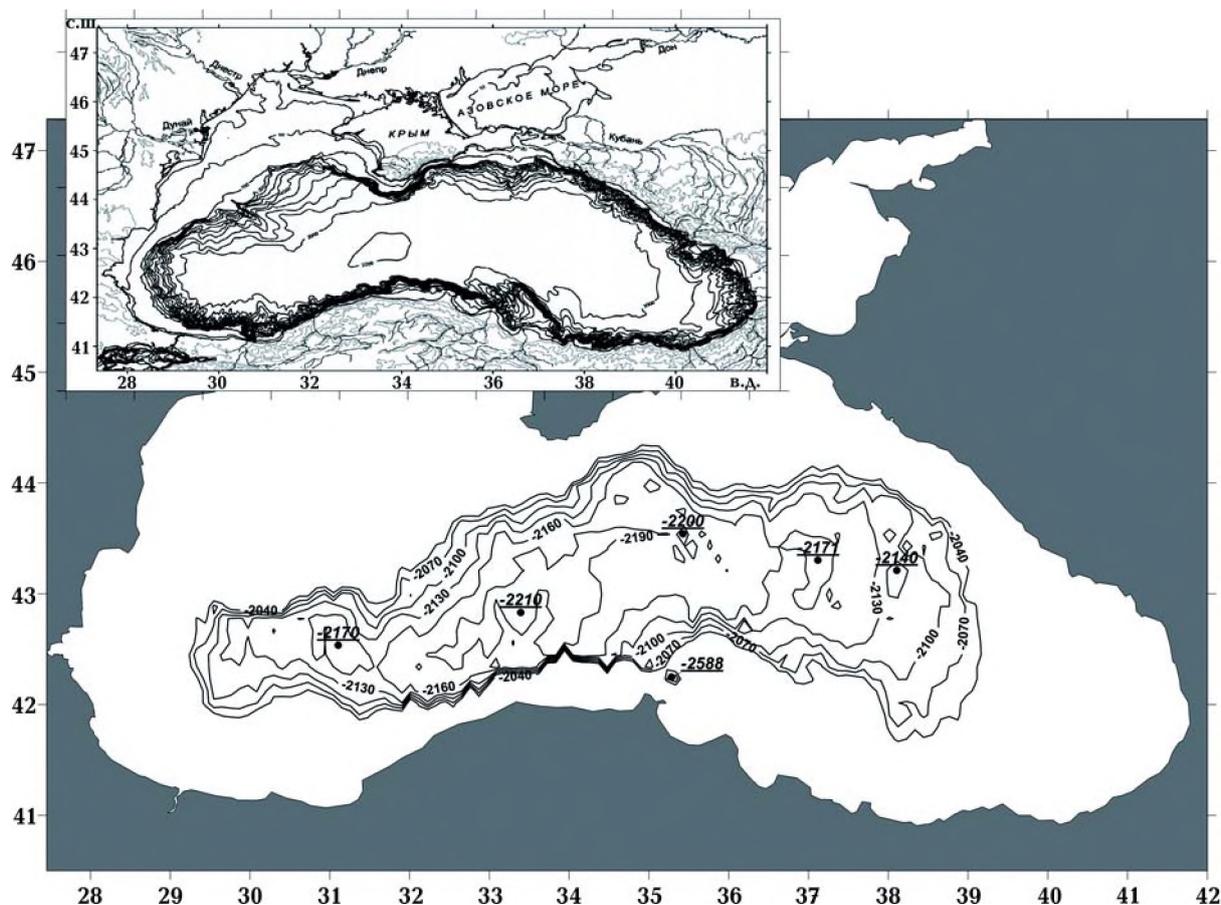


Рис. 1. Рельеф дна центральной котловины Черного моря ниже 2000 м (с изобатами через 30 м до глубины 2210 м). На вставке приведена карта глубин дна всего моря с изобатами через 200 м [Иванов, Белокопытов, 2011].

ровом слое, так и описанную в литературных источниках [Иванов, Белокопытов, 2011]. На горизонте 1500 м было выявлено три района с максимальными значениями солёности в центральной котловине моря ($43,0^\circ$ с. ш. и $31,0^\circ$ в. д. — солёность $22,337\text{‰}$; $42,7^\circ$ с. ш. и $35,4^\circ$ в. д. — солёность $22,37\text{‰}$; $42,5^\circ$ с. ш. и $38,5^\circ$ в. д. — солёность $22,332\text{‰}$) и все те же два района все в тех же юго-западных и юго-восточных районах Черного моря ($41,7^\circ$ с. ш. и $31,0^\circ$ в. д. — солёность $22,36\text{‰}$ и $41,7^\circ$ с.ш. и $39,0^\circ$ в.д. — солёность $22,347\text{‰}$).

Заметим, что распределение солёности по горизонтам на анализируемых картах показало существование по соседству с центрами куполов (в точках с абсолютным максимумом) точек с такой же высо-

кой солёностью (всего на $0,01\text{—}0,02\text{‰}$ ниже максимума), а иногда даже двух абсолютных максимумов. В таких случаях, чтобы получить более реальные результаты в водной среде, положение необходимой точки максимума получали пространственным осреднением (и координаты их значения).

Ориентируясь на положения центров куполов повышенной солёности в придонном слое (на горизонте 1500 и 2000 м), выделялись в вышележащей толще вод (1200—0 м) аналогичные зоны, находящиеся под воздействием интрузионного вторжения. Графики изменения положения по длине центров куполов повышенной солёности в толще вод моря (рис. 2, а) и величины абсолютных максимумов ее значений

(рис. 2, б) от дна до поверхности показывают существование в среднемноголетнем годовом цикле трех зон с высокими значениями солености. В среднем они располагались в широтной полосе между $42,5^\circ$ и $43,5^\circ$ с. ш. и $31,7^\circ$; $35,9^\circ$; $38,6^\circ$ в. д. (см. рис. 2, а). Максимальная соленость изменялась от 22,36—22,39 ‰ в придонных горизонтах котловины моря до 18,32—18,36 ‰ на поверхности моря (см. рис. 2, б). Центр самого восточного купола высокой солености, расположенный на $38,6^\circ$ в. д., обрывался на 400-метровой глубине, а западного и центрального куполов (соответственно на $31,7^\circ$ и $35,9^\circ$ в. д.) простирался до самой поверхности. Таким образом, глубина 400 м для восточного купола высокой солености явилась тем предельным горизонтом, на котором трансформация и перемешивание вторгающихся высокосоленых вод привели к выравниванию плотности (и солености) с окружающими водами. Обобщенное положение средневзвешенных центров куполов и очагов максимальной солености, а также значения фактической солености в них приведено в табл. 1.

В вертикальном распределении максимальной солености Черного моря по данным в центрах куполов обращает на себя

внимание резко выраженный перепад (градиент) ее между поверхностью и глубиной 400 м (~ 4 ‰ на 400 м, или 1 ‰ на 100 м) и слабое изменение ее в глубоководной части моря между глубинами 400 и 2000 м (0,47 ‰ на 1600 м, или 0,03 ‰ на 100 м).

Причинами возникновения и существования трех зонально расположенных куполов вод с максимально высокими среднегодовыми величинами солености (заполнивших депрессии в глубоководной котловине Черного моря) и еще двух в юго-западной и юго-восточной прибрежных частях следует считать мраморноморские воды средиземноморского происхождения, поступившие через пролив Босфор, так как других источников нет.

Причина постоянного присутствия высокосоленых вод в юго-западном прибосфорском районе кажется простой и хорошо описана в литературных источниках [Богданова, 1969, 1972; Ильин, 2012, 2016]. Вышедшие из пролива воды впервые встречаются и перемешиваются с черноморскими водами различного происхождения: поверхностными с их хорошо выраженной сезонной модификацией, холодного промежуточного слоя и промежуточными водами. Естественно, некоторое ко-

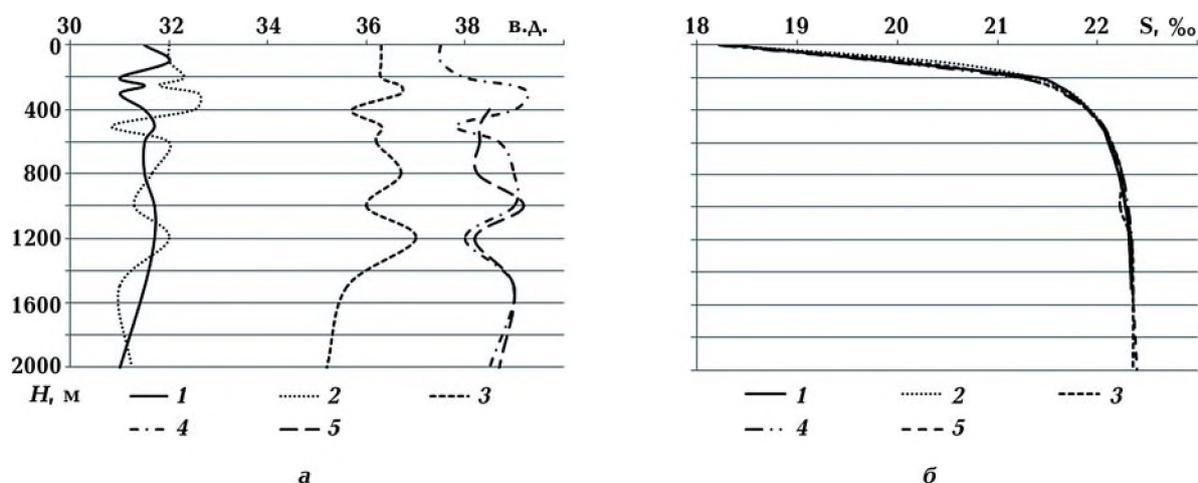


Рис. 2. Долготное положение центров куполов и очагов максимумов солености в котловине дна моря и в его юго-западной и юго-восточной частях (а), а также значение абсолютных величин солености в них (б) в среднегодовом поле: а — 1, 4 — очаг SW и SE; 2, 3 и 5 — купол 1, 2 и 3; б — 1 — $S_{\max 1}$, 2 — $S_{\max 2}$, 3 — $S_{\max SE}$, 4 — $S_{\max SW}$, 5 — $S_{\max 3}$.

Т а б л и ц а 1. Положение на акватории Черного моря центров куполов и очагов максимальной солености (их координат), а также значений средневзвешенных максимумов солености в полях средних, минимальных и максимальных значений рассматриваемой характеристики

Центр очага максимальной солености в юго-западном углу Черного моря			Центры куполов максимальной солености в котловине дна Черного моря												Центр очага максимальной солености в юго-восточном углу Черного моря		
			Купол 1			Купол 2			Купол 3			Купол 4					
с. ш.	в. д.	S_{\max} , ‰	с. ш.	в. д.	S_{\max}	с. ш.	в. д.	S_{\max}	с. ш.	в. д.	S_{\max}	с. ш.	в. д.	S_{\max}	с. ш.	в. д.	S_{\max} , ‰
41,9	31,7	21,56	Поле среднегодовой солености воды												41,8	39,5	21,93
			—	—	—	43,0	32,0	21,59	42,5	36,5	21,48	42,5	38,6	22,22*			
			Поле минимальной среднегодовой солености воды														
41,3	30,6	21,33	43,1	31,1	21,34	43,1	33,4	21,36	43,3	36,1	21,35	42,5	38,2	21,27	41,9	38,5	21,27
			Поле максимальной среднегодовой солености воды														
41,8	30,8	22,27	43,5	30,7	22,34	43,3	33,1	22,60	43,3	36,0	22,25	43,0	38,5	22,29	41,8	38,6	22,27

* — слой 400—2000 м.

личество высокосоленых уже частично трансформированных вод, как показывают исследования [Богданова, 1969], может оставаться на шельфе, часть опускается в промежуточные слои, где также принимает участие в дальнейшем перемешивании в толще вод моря, а часть опускается до дна, заполняя придонные котловины и формируя купола повышенной солености. Несмотря на динамическую активность вод в прибосфорском районе Черного моря, существование здесь ($41,9^\circ$ с. ш. и $31,7^\circ$ в. д.) очага с максимально высокими значениями солености во всей толще вод от 2000 м до поверхности с характеристиками солености, подобными наблюдающейся в центрах трех куполов центральной котловины моря, выглядит несколько неожиданно и трудно объяснимо. Возможно, причина заключается в возникновении в этом районе условного вакуума воды, обусловленного большим оттоком через пролив в Мраморное море черноморских низкосоленых вод в объеме, в два раза большем, чем втекающих с нижнебосфорским течением. Для решения этой задачи необходимы дополнительные исследования.

Очаг повышенной солености, выявленный в юго-восточном районе моря, также заслуживает более детального рассмотрения. Анализ распределения солености, проведенный на различных горизонтах построенных карт этой характеристики с выделением положения центров очагов максимумов и самой величины, позволил установить здесь наличие трех таких очагов, которые соседствуют между собой (табл. 2). Величины солености в центрах этих очагов по горизонтам были такими же значительными, как в юго-западном прибосфорском очаге и в центрах куполов котловины дна моря. На глубине 2000 м в одном из очагов была зафиксирована самая большая соленость для всего рассмотренного массива значений — 22,40‰. Следует отметить, что восточные и юго-восточные побережья Черного моря характеризуются на поверхности и в толще вод более высокими значениями солености, чем на западном побережье, и это

является общепланетарной закономерностью.

Природа формирования и развития своеобразных процессов на восточных и юго-восточных побережьях Черного моря подобна аналогичным на восточном побережье Каспийского моря, а также на восточных побережьях экваториальных широт Атлантики и Тихого океана, и связана с постоянным действием трех глобальных сил [Андрианова, Белевич, 2003]: неравномерным поступлением тепла от солнца (экватор—полюса), вращением Земли (в том числе его вариации) и силой тяжести.

Обращает на себя внимание интересная особенность в циркуляции вод на юго-востоке Черного моря — отход струи Основного черноморского течения (ОЧТ) (обычно прижатой к свалу глубин шельфа) в районе несколько западнее Трабзона к северо-востоку с пересечением моря по его глубоководной части. В результате такого поворота справа от ОЧТ в прибрежном районе формируется антициклоническое вихревое образование овальной формы с зональным размером до 250 км и меридиональным около 150 км. Это образование сформировалось и постоянно здесь существует в виде хорошо выраженного круговорота вод с опусканием их в его центре и подъемом на периферии (в том числе на Трабзон-Батумском побережье). Некоторые авторы именуют его как "батумское антициклоническое вихревое течение" [Динамические ..., 2003].

Выполненные оценки трендов зонального распределения солености на акватории Черного моря по горизонтам показали положительные их значения (наклон с востока на запад) во всей нижележащей толще вод от 2000 до 400 м и отрицательные (наклон с запада на восток) в верхнем слое от 300 до 0 м.

Установленные центры куполов в котловине дна Черного моря и значения максимумов солености в них были сопоставлены с известными результатами, в частности с девятью картами солености воды [Океанографічний ..., 2009] на горизонтах, часть из которых совпадает с нашими (0,

100, 300, 400, 500, 1000, 1200, 1500, 2000 м). Карты для горизонтов со среднемесячными данными о солености воды (0, 100 и 300 м) были пересчитаны до среднегодовых. Положение центров куполов по картам Атласа оценивалось визуально по координатам, а за величину абсолютного максимума солености центра купола принималось значение последней изохалины. Сравнение положения по долготе и изменения с глубиной двух центров куполов максимальной солености, вычисленных по данным карт Атласа и двух аналогичных центров куполов по результатам наших исследований (западного и центрального), показало их согласованность (в среднем отклонения были не более $0,1—0,2^\circ$ долготы). Выделяемый нами третий купол высокой солености, располагающийся в восточной части центральной котловины моря с центром на $38,7^\circ$ в. д. и отмечаемый лишь в толще вод, начиная с глубины 400 м и до дна, на картах Атласа не выделился, хотя его существование встречается в литературных источниках и, в частности, в работе [Динамические ..., 2003]. Отсутствуют также на картах Атласа и локальные очаги максимальной солености, выделенные нами в юго-западной и юго-восточной частях моря.

Проведенное осреднение солености воды по горизонтам для всех трех полей и построенный по ним график вертикального изменения солености с глубиной, показанный на рис. 3, отличался некоторым своеобразием. Можно увидеть, что в поле среднегодовой многолетней изменчивости солености ход ее значений с глубиной имеет вид относительно гладкой и плавной кривой, тогда как в изменчивости солености в среднегодовых полях ее экстремумов (min и max) по горизонтам на глубинах от 300 до 1200 м кривые имеют вид ломаных линий. В поле минимальных значений солености между глубинами 500 и 600 м хорошо виден слой однородной воды: соленость на 500 м ($21,645\text{‰}$) даже на $0,007\text{‰}$ выше, чем на 600 м ($21,638\text{‰}$). В поле максимальной солености также выделяется однородный слой воды между глу-

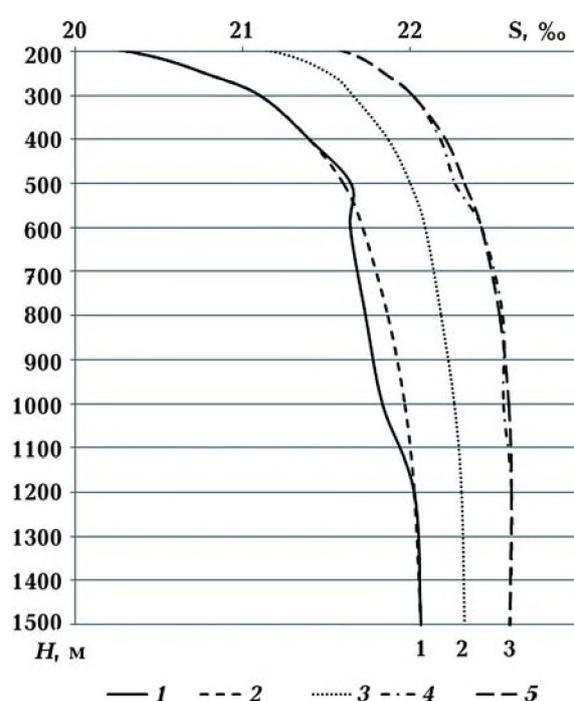


Рис. 3. Изменения с глубиной осредненной по горизонтам солености воды в среднегодовых полях ее минимальных (1), средних (2) и максимальных (3) значений: 1 — S_{\min} , 2 — $S_{\min \text{cor}}$, 3 — S , 4 — S_{\max} , 5 — $S_{\max \text{cor}}$.

бинами 800 и 1000 м: на 800 м — $22,547\text{‰}$, а на 1000 м — $22,551\text{‰}$.

Причина такого своеобразного распределения солености — существование в этих слоях хорошо развитого динамического процесса смешения высокосоленых мраморноморских вод со слабосолеными черноморскими. Для большей наглядности характера развития этого процесса кривая среднегодового многолетнего изменения с глубиной средней солености воды (рис. 3, кривая 2) была перенесена и совмещена с ломаными кривыми минимальной (рис. 3, кривая 1) и максимальной солености (рис. 3, кривая 3), условно полагая, что такими они бы были при отсутствии перемешивания вод (рис. 3, кривая 2). Исходя из этого можно заключить, что в поле минимальной солености (см. рис. 3, кривая 1) на глубинах 400—500 м процесс смешения приводит к образованию вод с несколько повышенной соленостью, достигающей на глубине 500 м — $21,645\text{‰}$; на 500—600 м ин-

тенсивность перемешивания такова, что в этом слое формируется однородная масса воды с соленостью 21,638 ‰, а ниже 600 м интенсивность смешения заметно ослабевает и завершается лишь на 1200-метровой глубине, где соленость достигает величины 22,02 ‰. Процесс неравномерной интенсивности перемешивания в поле максимальных значений солености (см. рис. 3, кривая 3) выражен заметно слабее и характеризовался тремя незначительными нарушениями плавности хода с глубиной. В слое 400—600 м процесс перемешивания пониженной интенсивности привел к снижению солености на глубине 500 м на 0,05—0,07 ‰. В однородном слое на глубинах 800—1000 м (соленость 22,547—22,552 ‰) более интенсивный процесс смешения вод вызвал некоторое повышение солености на 800 м (примерно на 0,04—0,06 ‰) и слабое понижение на глубине 1000 м (примерно на 0,09 ‰), а ниже 1000 м наблюдался процесс выравнивания ее до 22,60 ‰.

Представилось интересным наряду с проведенным выше анализом средних по горизонтам значений солености воды в трех ее полях показать также средние взвешенные величины этой характеристики во всем объеме Черного моря. Вычисленное среднее взвешенное значение солености воды в поле ее фактических среднегодовых величин в объеме моря было равно 21,92 ‰ (в работе [Иванов, Белокопытов, 2011] приведено ее значение 21,96 ‰). Средние взвешенные значения солености воды в полях ее среднегодовых экстремумов (min и max) в объеме моря были равны соответственно 21,42 и 22,26 ‰.

Аналогично описанным исследованиям были проанализированы также очаги максимальной солености в полях ее экстремальных значений. При этом очаги максимальной солености устанавливались по картам на 13 горизонтах и выделены для каждого поля.

Анализ положения центров куполов и очагов максимальной солености в полях ее экстремумов (рис. 4 и 5) показал присутствие в центральной котловине дна

Черного моря четырех центров куполов максимальной солености, пронизывающих всю толщу моря от 2000 м до поверхности, тогда как в среднегодовом поле их было три (см. рис. 2). Четвертый купол максимума солености в полях минимальной и максимальной солености занимал крайне западное положение с центром в поле минимума (см. рис. 4) с координатами 43,1° с. ш. и 31,1° в. д. и средней взвешенной соленостью 21,68 ‰, а в поле максимума (см. рис. 5) — 43,5° с. ш. и 30,7° в. д. и соленостью 22,34 ‰. Положение остальных трех куполов хорошо согласовывалось со всеми максимумами среднегодового поля (см. табл. 1).

В полях экстремумов солености так же, как и в поле ее среднегодовых многолетних значений, присутствуют по два локальных очага высокой солености, расположенных в юго-западной и юго-восточной частях моря. В юго-западной части моря в поле максимумов (см. рис. 5) наряду с упомянутым очагом максимальной солености выявлен район моря (в квадрате к западу от него), в котором наблюдения почти постоянно фиксировали в толще вод на ряде горизонтов очаги очень высоких значений солености, достигающие до ~24—25 ‰ и выше. На рис. 5, а приведено положение с глубиной этого района, а на рис. 5, б — распределение с глубиной величины самой солености. Вычисленное его положение, а также величина солености слоя 0—1500 м были следующими: координаты 41,7° с. ш., 29,57° в. д., соленость 23,676 ‰. Положение всех центров куполов и очагов максимальной солености, а также значения фактической солености в них во всех трех полях (среднем, минимальном и максимальном) по акватории моря отражает табл. 1.

В поле средней солености и полях экстремумов в юго-восточной части Черного моря при детальном анализе установлено три компактно располагавшихся локальных очага высокой солености вместо предполагавшегося здесь лишь одного. Сведения о выявленном положении в юго-восточном районе моря центров очагов мак-

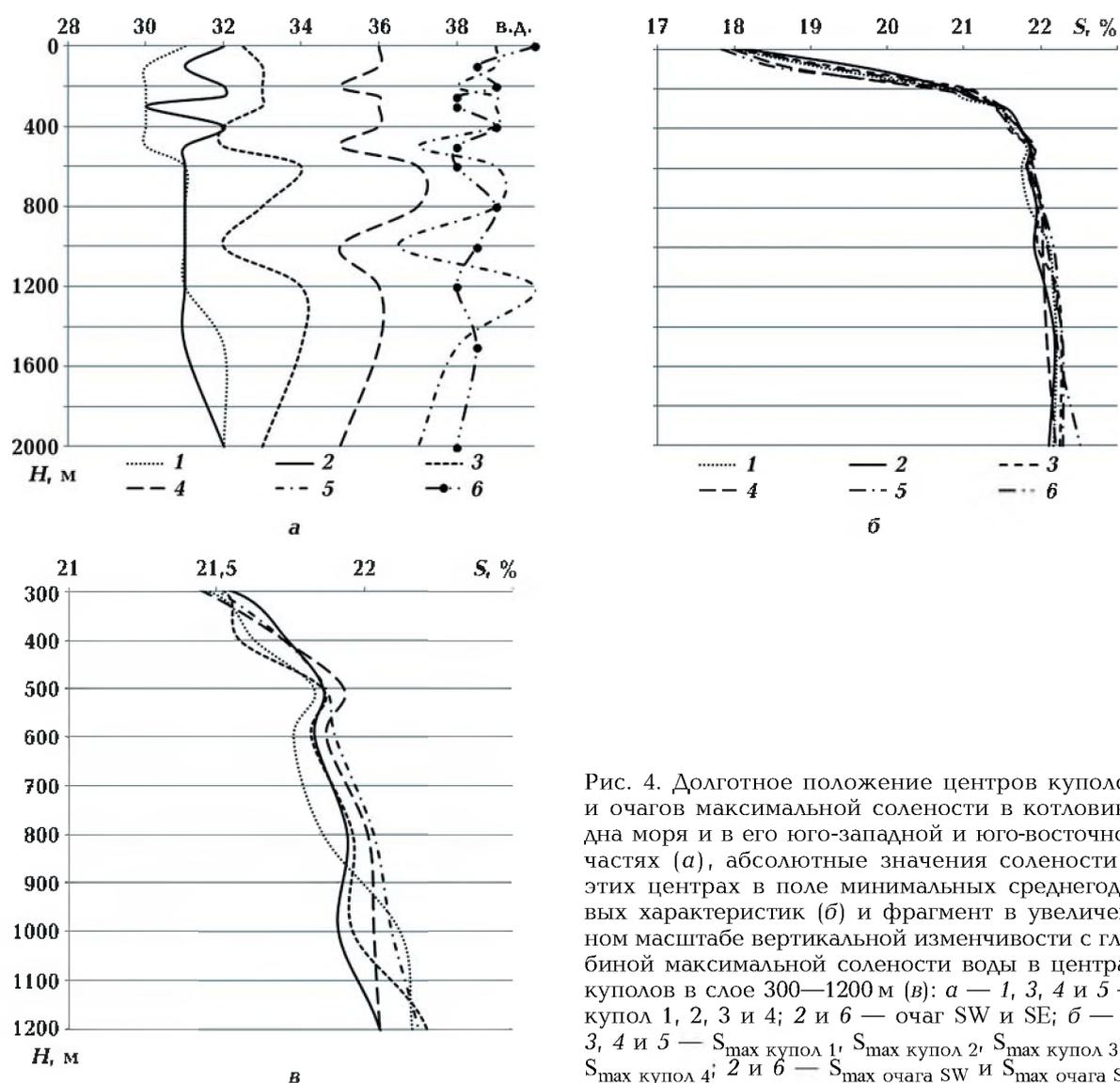


Рис. 4. Долготное положение центров куполов и очагов максимальной солености в котловине дна моря и в его юго-западной и юго-восточной частях (а), абсолютные значения солености в этих центрах в поле минимальных среднегодовых характеристик (б) и фрагмент в увеличенном масштабе вертикальной изменчивости с глубиной максимальной солености воды в центрах куполов в слое 300—1200 м (в): а — 1, 3, 4 и 5 — купол 1, 2, 3 и 4; 2 и 6 — очаг SW и SE; б — 1, 3, 4 и 5 — S_{\max} купол 1, S_{\max} купол 2, S_{\max} купол 3 и S_{\max} купол 4; 2 и 6 — S_{\max} очага SW и S_{\max} очага SE.

симальной солености во всех трех полях (среднем, минимальном и максимальном) приведены в табл. 2. Насколько они достоверны, вероятно покажут результаты дальнейших исследований. Вместе с тем можно утверждать, что квадрат в юго-восточной части моря между $41,0^\circ$ с. ш. и $42,5^\circ$ с. ш. и $38-40^\circ$ в. д. является очагом высокосоленых вод и районом интенсивного выхода к поверхности глубинных вод.

Детальные особенности вертикального распределения максимумов солености в определенных слоях толщи вод моря на горизонтах от 300 до 1200 м представлены в укрупненном масштабе на рис. 4, в

и 5, в. В поле минимальной солености (см. рис. 4, в) на горизонтах 500—600 м и частично в слое 800—1000 м, а в поле максимальной солености (см. рис. 5, в) на горизонтах 400—500 м и частично на тех же 800—1000 м происходят заметные нарушения в вертикальном ходе кривых. Максимум солености на горизонтах 500 и 800 м в первом случае и 400 и 800 м во втором имеют более высокие значения, чем на 600 и 1000 м в первом случае и 500 и 1000 м во втором. Другими словами, существующее здесь перемешивание приводит даже к формированию в отдельных слоях однородных вод. Причина такого аномального

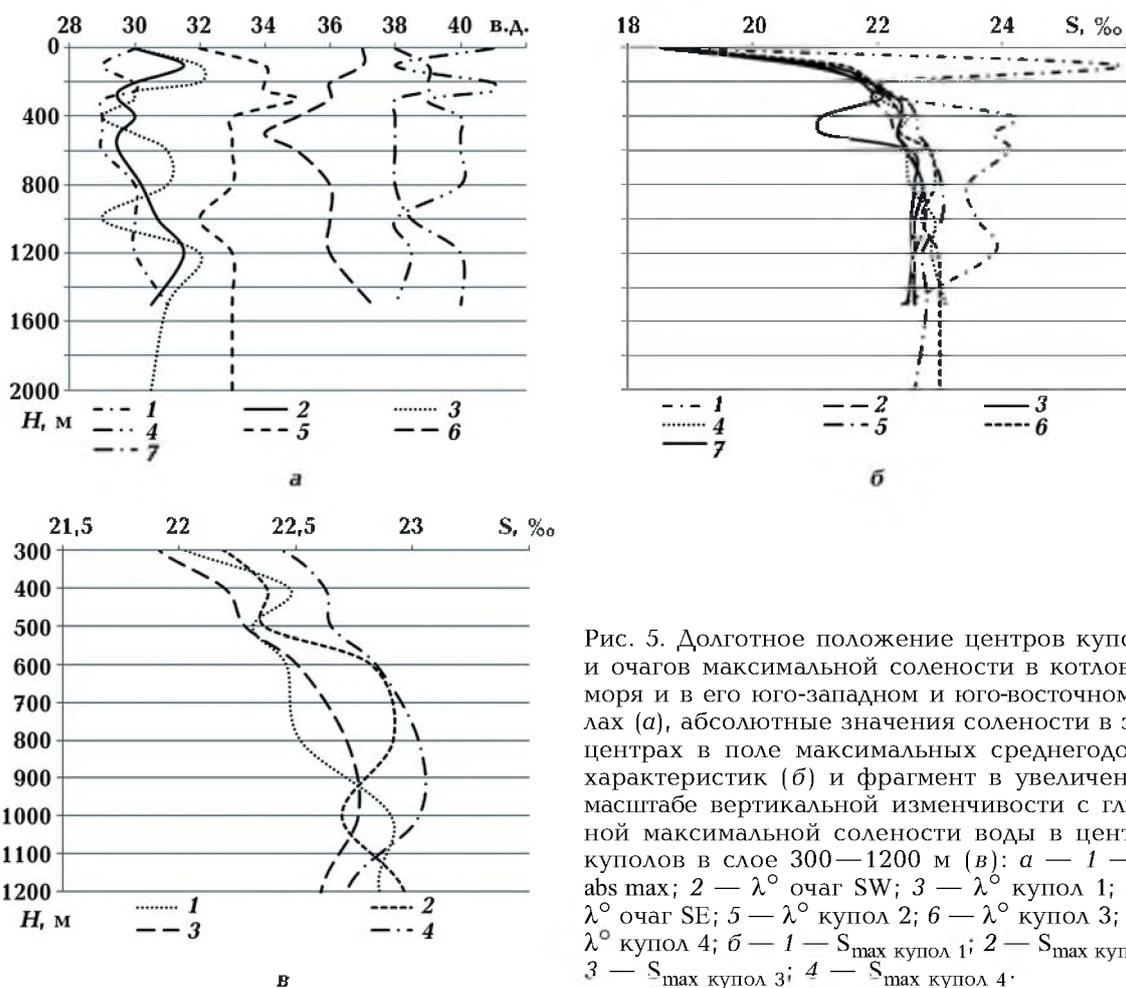


Рис. 5. Долготное положение центров куполов и очагов максимальной солености в котловине моря и в его юго-западном и юго-восточном углах (а), абсолютные значения солености в этих центрах в поле максимальных среднегодовых характеристик (б) и фрагмент в увеличенном масштабе вертикальной изменчивости с глубиной максимальной солености воды в центрах куполов в слое 300–1200 м (в): а — 1 — λ° abs max; 2 — λ° очаг SW; 3 — λ° купол 1; 4 — λ° очаг SE; 5 — λ° купол 2; 6 — λ° купол 3; 7 — λ° купол 4; б — 1 — S_{\max} купол 1; 2 — S_{\max} купол 2; 3 — S_{\max} купол 3; 4 — S_{\max} купол 4.

распределения по глубине кривых солености связана с хорошо развитыми в упомянутых слоях процессами перемешивания высокосоленных вод, поступивших из пролива Босфор, со слабосолеными собственно черноморскими водами.

Выводы. Впервые на подробной батиметрической карте рельефа дна центральной

котловины Черного моря (на глубинах свыше 2000 м с дискретностью изобат через 30 м) выявлены четыре зонально расположенные депрессии (впадины) с максимальными глубинами 2170, 2210, 2171 и 2140 м (см. рис. 1).

В придонных водах депрессий дна центральной котловины Черного моря (в поле

Т а б л и ц а 2. Положение центров очагов максимальной солености воды в юго-восточной части Черного моря в трех его полях

Поле средней солености		Поле минимальной солености		Поле максимальной солености	
с. ш.	в. д.	с. ш.	в. д.	с. ш.	в. д.
42,3°	38,2°	42,3°	39,0°	42,3°	38,2°
41,7°	39,9°	41,7°	39,0°	41,7°	39,4°
41,0°	39,0°	41,0°	39,0°	41,0°	39,0°

среднегодовых многолетних значений солености) выявлено три очага с максимально высокими ее значениями, а также два локальных очага в юго-западном (прибосфорском) и юго-восточном (Батуми—Трабзон) прибрежных районах моря. Они прослеживаются на всех стандартных горизонтах (от 2000 и до 0 м), за исключением третьего восточного купола (на $38,6^\circ$ в. д.), который наблюдался от 2000 м до горизонта 400 м. Детальный анализ показал наличие в юго-восточном районе Черного моря не одного, а трех компактно расположенных очагов высокой солености.

Сопоставление полученных результатов с известными литературными сведениями [Океанографічний ..., 2009] показало совпадение по положению в пространстве и величинам солености в них лишь двух куполов. Выделенный в слое 2000—400 м на $38,7^\circ$ в. д. третий купол и два локальных очага высокой солености в юго-западном и юго-восточном районах моря на картах Атласа не были обнаружены.

Показана природа происходящих в море динамических процессов: восходящие вертикальные движения, возникающие при интрузии вод из глубин в вышележащие слои, взаимодействуя с силой Кориолиса, приводят к образованию в куполах высокой солености горизонтальной циркуляции циклонического характера. Этот процесс развивается и существует во всей толще вод от придонных слоев до поверхности моря.

Выявлены хорошо выраженные нарушения в вертикальном распределении кривых экстремумов солености (в отличие от хода кривой среднего поля), обусловленные процессами перемешивания вод. В поле минимальной солености (см. рис. 4, а)

эти нарушения прослеживаются на горизонтах от 300 до 1200 м с формированием даже однородного слоя воды на глубинах 500—600 м. В поле максимальной солености (см. рис. 5, в) выделяется резкое уменьшение градиента на горизонте 400—500 м, а также формирование однородного слоя воды на глубинах 800—1000 м.

В полях экстремумов среднегодовой солености (min и max) центральной котловины дна Черного моря выявлено четыре купола высокосоленых вод (см. рис. 4, а, б и 5, а, б), тогда как в поле среднегодовых ее значений наблюдалось только три (см. рис. 2, а, б). Четвертый купол, выявленный только в полях экстремумов солености, занимал крайне западное положение в котловине моря и располагался на $30,7$ — $31,1^\circ$ в. д. Локальные очаги солености в полях экстремумов располагались в юго-западной и юго-восточной частях моря примерно в тех же районах, что и в среднегодовом поле. В полях экстремумов также выделено три компактно расположенных очага высокой солености в юго-восточной части Черного моря.

Результаты исследований дают основание обратить внимание на следующие особенности при их дальнейшей интерпретации. Поскольку речь идет о жидкой динамической среде, приводимые в тексте сведения (положение в море точек, очагов, куполов и т. п.) соответствуют рассмотренным данным, поэтому в дальнейшем анализе необходимо использовать указанные области. Для уточнения динамики процессов в Черном море рекомендуется привлечение дополнительной информации не только о гидрофизических характеристиках, но и гравитационных, магнитных и сейсмических полях данного региона.

Список литературы

- Андрианова О.Р., Белевич Р.Р. О связи некоторых океанографических характеристик с вариациями угловой скорости вращения Земли. *Метеорология и гидрология*. 2003. № 11. С. 64—71.
- Богданова А.К. Гидрология Босфора и прибосфорского района Черного моря. В кн.: *Водообмен через Босфор и его влияние на гидрологию и биологию Черного моря*. Киев: Наук. думка, 1969. С. 5—121.
- Богданова А.К. Сезонные и межгодовые колебания водообмена через Босфор. В кн.: *Биология моря*. Киев: Наук. думка, 1972. Вып. 27. С. 41—54.
- Богуславский С.Г., Совга Е.Е., Казаков С.И. Влияние поля солености на положение верхней границы зоны сероводорода в Черном море. *Морской гидрофизический журнал*. 2006. № 1. С. 16—21.
- Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Под ред. В.Н. Еремеева. Севастополь: Изд. МГИ НАН Украины, 2006. 210 с.
- Динамические процессы береговой зоны моря. Под ред. Р.Д. Косьяна, И.С. Подымова, Н.В. Пыхова. Москва: Научный мир, 2003. 320 с.
- Зубов Н.Н. Основы учения о проливах Мирового океана. Москва: Географиз, 1956. 240 с.
- Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: Изд. МГИ НАН Украины, 2011. 213 с.
- Ильин Ю.П. Климатические изменения гидрометеорологического режима морей Украины: Дис. ... д-ра географ. наук. Киев, 2016. 380 с.
- Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Белокопытов В.М., Горячкин Ю.М., Дьяков М.М., Кубряков А.О., Станичный С.В. Гидрометеорологические условия морей Украины: Т. 2. Черное море. Севастополь: Изд. Морского отделения УкрНИГМИ, 2012. 421 с.
- Океанографічний атлас Чорного та Азовського морів. Київ: Вид. ДУ "Держгідрографія", 2009. 356 с.
- Статистические характеристики термохалинной структуры вод Черного моря. Под ред. Э.Н. Альтмана. Севастополь: Изд. Гос. океанограф. ин-та, 1987. 302 с.
- Суховой В.Ф. Моря Мирового океана. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 287 с.
- Суховой В.Ф., Рубан И.Г., Ибришин А.Н. О водообмене Черного моря со Средиземным и скоростях течений в проливе Босфор. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. № 10. С. 217—225.
- Falina, A., Sarafanov, A., Ozsoy, E., & Turuncoglu, U.U. (2017). Observed basin-wide propagation of Mediterranean water in the Black Sea. *Journal of Geophysical Research*, 122 (4), 3141—3151. doi:10.1002/2017JC012729.

Marmara Sea waters with the Mediterranean origin in the formation of the salinity and dynamics fields in the Black Sea

O. R. Andrianova, R. R. Belevich, M. I. Skipa, 2019

The peculiarities of the bottom of the central basin of the Black Sea are specified, and four depression zones with maximum depths of 2170, 2210, 2171 and 2140 m were allocated for the first time, as well as the positions of the focuses of maximum salinity in the Black Sea water column in a long-term climatic plan. The presence of three foci of maximum salinity in the water column, which are connected with the bottom depressions in the central Black Sea basin, and two similar foci which are located in the coastal areas of the sea (SW — the Bosphorus and SE — the Batumi-Trabzon area), was determined with the field of factual average annual salinity. In the fields of salinity extremes, there are 4 foci of maximum salinity in the central basin of the sea and two ones in the SW and SE sea coastal areas. The nature of their occurrence and permanent existence was explained by the entry of highly salted Marmara Sea waters of Mediterranean origin into the bottom layers of the Black Sea and their further intrusion from the depths to the surface because there are no other sources of high-saline waters. The up-welling vertical movements that occur during the intrusion of water from the depths into the overlying layers are interacted with the Coriolis force and are led to the formation of horizontal cyclonic circulation in high salinity cupolas. This process develops and exists in the entire water column. The differences are established in the vertical distribution of average and extreme salinity. Well-defined disturbances caused by water mixing processes are traced in the curves of salinity extremes: in the field of minimal salinity they are located at horizons from 300 to 1200 m with the formation of even a homogeneous layer of water at depths of 500—600 m; in the field of maximum salinity, a abrupt decrease in the gradient at the horizon of 400—500 m, as well as the formation of a homogeneous layer of water at depths of 800—1000 m.

Key words: annual average, maximum, minimum salinity, intrusions, domes, foci, mixing of waters, circulation.

References

- Andrianova, O. R., & Belevich, R. R. (2003). On the connection of some oceanographic characteristics with variations in the angular velocity of the Earth's rotation. *Meteorologiya i gidrologiya*, (11), 64—71 (in Russian).
- Bogdanova, A. K. (1969). Hydrology of the Bosphorus and the Bosphorus region of the Black Sea. In *Water exchange through the Bosphorus and its influence on the hydrology and biology of the Black Sea* (pp. 5—121). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Bogdanova, A. K. (1972). Seasonal and interannual fluctuations in water exchange through the Bosphorus. In *Biology of the Sea* (is. 27, pp. 41—54). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Boguslavsky, S. G., Sovga, E. E., & Kazakov, S. I. (2006). The influence of the salinity field on the position of the upper boundary of the hydrogen sulfide zone in the Black Sea. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, (1), 16—21 (in Russian).
- Goryachkin, Yu. N., & Ivanov, V. A. (2006). *Black Sea level: past, present and future*. V. N. Eremeev (Ed.). Sevastopol: Edition of the Marine Hydrophysical Institute of the NAS of Ukraine, 210 p. (in Russian).
- Zubov, N. N. (1956). *Fundamentals of the doct-*

- rine of the strains of the oceans*. Moscow: Geografiz, 240 p. (in Russian)
- Ivanov, V. A., & Belokopytov, V. N. (2011). *Oceanography of the Black Sea*. Sevastopol: Edition of the Marine Hydrophysical Institute of the NAS of Ukraine, 213 p. (in Russian).
- Ilyin, Yu. P. (2016). Climatic changes in the hydrometeorological regime of the seas of Ukraine: Doctor's thesis. Kiev, 380 p. (in Russian).
- Ilyin, Yu. P., Repetin, L. N., Belokopytov, V. M., Goryachkin, Yu. M., Dyakov, M. M., Kubryakov, A. O., & Stanichny, S. V. (2012). *Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine* (Vol. 2. Black Sea). Sevastopol: Edition of the Maritime Department of UkrNIGMI, 421 p. (in Russian).
- Kosyan, R. D., Podymov, I. S., & Pykhov, N. V. (Eds.). (2003). *Dynamic processes of the coastal zone of the sea*. Moscow: Nauchnyy Mir, 320 p. (in Russian).
- Oceanographic Atlas of the Black and Azov Seas. (2009). Kyiv: Publications of State Hydrography, 356 p. (in Ukrainian).
- Altman, E. N. (Ed.). (1987). *Statistical characteristics of the thermohaline structure of the Black Sea waters*. Sevastopol: Publ. of the State Oceanographic Institute, 302 p. (in Russian).
- Sukhovey, V. F. (1986). *Sea of the World's oceans*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 287 p. (in Russian).
- Sukhovey, V. F., Ruban, I. G., & Ibrishin, A. N. (2012). About the water exchange of the Black Sea with the Mediterranean and the current velocities in the Bosphorus. *Ukrayinskyy hidrometeorologichnyy zhurnal*, (10), 217—225 (in Russian).
- Falina, A., Sarafanov, A., Ozsoy, E., & Turuncoglu, U. U. (2017). Observed basin-wide propagation of Mediterranean water in the Black Sea. *Journal of Geophysical Research*, 122 (4), 3141—3151. doi:10.1002/2017JC012729.