

Особенности динамики температуры и солёности поверхностного слоя воды в проливе Босфор и на его черноморском шельфе

Р.Р. Белевич, О.Р. Андрианова, А.А. Батырев, М.И. Скипа, 2020

ГУ «Отделение гидроакустики Института геофизики им. С.И. Субботина
НАН Украины», Одесса, Украина

Поступила 10 апреля 2020 г.

По данным непрерывной регистрации на ходу судна температуры и солёности поверхностного слоя воды на черноморском шельфе пролива Босфор и в самом проливе рассчитаны по среднемесячным значениям за 1998—2000 гг. средние за три года их значения — соответственно 15,45 °С; 17,37 ‰ и 15,20 °С; 17,48 ‰, а также оценено их широтное распределение и сезонный ход. Отмечено своеобразное широтное распределение температуры и солёности поверхностного слоя воды: на шельфе изолинии имеют меридиональную направленность, поскольку в их изменчивости доминировал климатический фактор; в проливе термохалинные характеристики существенно различаются в результате действия динамического фактора — процесса перемешивания встречающихся здесь вод. Черноморская вода, поступив в пролив, медленно перемещается со средиземноморской водой в придонном слое. Достигнув порога, процесс из медленного (со скоростью изменения по температуре и солёности, соответственно 0,5 °С и 1,1 ‰ на 1 градус широты) превращается в лавинообразный (со скоростью 5,9 °С и 6,4 ‰ на 1 градус широты), что определяет особенности распределения температуры и солёности воды в проливе Босфор. Установлено, что, проходя через пролив, черноморская вода в среднем понижает свою температуру на 1,5 °С и повышает солёность на 1,5 ‰. Сезонный ход температуры воды в проливе имеет более низкие значения, чем на шельфе. В годовом ходе солёности воды на шельфе обнаружено существование двух экстремумов (основного и вторичного), в результате процесса смешения в проливе Босфор поступившие воды теряют вторичный экстремум солёности. Установлено круглогодичное присутствие вод с пониженной солёностью на районе стыка шельфа и пролива (по широте 41,25° с. ш.), что объясняется вдольбереговым течением, распространяющимся узкой полосой вдоль северного побережья Турции. В результате в пролив поступают прежде всего воды прибрежного течения, а не из открытых акваторий шельфа. Меридиональная ширина этого течения, по предварительным оценкам, колеблется до 10 км.

Ключевые слова: Черное море, пролив Босфор, температура, солёность, широтное распределение, сезонный ход, средние значения, экстремумы.

Введение. Пролив Босфор представляет собой важную водную транспортную магистраль, позволяющую государствам Черноморского бассейна осуществлять торговый товарооборот и другую взаимосвязь со всеми странами мира. Этот товарооборот в настоящее время оказался столь значительным, что возникла очередность при проходе через него судов, поэтому правительство Турции приняло решение и приступи-

ло к строительству искусственного водного путепровода, параллельного Босфору. Его роль и влияние на судьбу Черного моря и населения прибрежных территорий еще предстоит выяснить.

Пролив Босфор соединяет Черное море с Мраморным, представляет собой узкий и длинный извилистый желоб с доминирующей меридиональной протяженностью с юго-юго-запада на северо-северо-восток

(генеральное направление $\sim 22^\circ$) и располагается между $41^\circ 00' \text{ с. ш.}$ и $41^\circ 15' \text{ с. ш.}$ и $29^\circ 00' \text{ в. д.}$ и $29^\circ 08' \text{ в. д.}$ (в статье удобнее использовать градусную градацию с точностью до $0,01^\circ \text{ с. ш.}$, т. е., соответственно $41,00^\circ \text{ с. ш.}$ и $41,25^\circ \text{ с. ш.}$ и $29,00^\circ \text{ в. д.}$ и $29,13^\circ \text{ в. д.}$). Пролив имеет двустороннюю по вертикали систему течений: верхним потоком, идущим с севера на юг, из Черного моря в Мраморное выносятся относительно малосоленые черноморские воды с соленостью до 18 ‰; нижним (придонным) потоком, наоборот, вносятся высокосолёные воды средиземноморского происхождения с соленостью вдвое выше (36—38 ‰). Динамические процессы в самом проливе и на его черноморском шельфе во многом определяют особенности пространственно-временного распределения гидрофизических полей всего моря. Интересно обратить внимание на замечания отдельных авторов [Богданова, 1972; Горячкин, Иванов, 2006], изучавших пролив Босфор и отметивших, что на концах пролива наблюдается заметная разность высот уровня между Черным и Мраморным морями. Согласно проведенным расчетам разности высот уровня морей по материалам турецких наблюдений [Горячкин, Иванов, 2006], она на концах пролива в среднегодовом масштабе составляла 44 см с сезонными колебаниями от 60 см в июне до 24 см в октябре. Эта разность составляла соответственно 57 в июне и 35 см в октябре при среднегодовой величине 42 см [Богданова, 1972]. Считается, что она обусловлена избыточным поступлением в Черное море вод с речным стоком и пониженным (по сравнению со Средиземным морем) испарением с поверхности. Природа двуслойного по вертикали характера течений в пролива Босфор известна давно [Зубов, 1956]: еще в конце 90-х годов позапрошлого столетия адмирал и ученый С.О. Макаров отмечал, что разность уровней Черного и Мраморного морей должна быть около одного фута и пяти дюймов (43,2 см), а верхнебосфорское течение, выносящее поверхностным потоком черноморские воды, обязано своим существованием именно этой разности вы-

сот уровня. Встречное придонное течение в проливе, несущее высокосолёные воды средиземноморского происхождения из Мраморного моря в Черное, обязано своим существованием разности удельных весов воды этих морей [Зубов, 1956].

Длина пролива Босфор составляет 32 км. Ширина у южного входа 2,6 км, а у северного 3,7 км. В самом проливе имеется сужение, где на протяжении 6—7 км ширина его уменьшается до 750 м. Рельеф дна в проливе сложный. В нем имеются впадины и пороги, особенно примечателен своим влиянием на процессы перемешивания вод порог, располагающийся примерно в 13 км к северу от южного входа в пролив. В целом дно пролива несколько наклонено на север. В южной части пролива глубины около 40 м. По направлению к Черному морю глубина его волнообразно возрастает, колеблясь внутри пролива в пределах от 50 до 90 м; на выходе из пролива глубины 65—70 м. Сразу же за северными выходными мысами пролива уже на прибосфорском шельфе обнаружена депрессия дна с глубинами до 100 м, которая к северу оказалась окруженной полукруглым порогом с глубиной около 50 м. Как только был обнаружен этот порог, отдельными исследователями была выдвинута гипотеза о том, что его присутствие может препятствовать поступлению высокосолёных вод средиземноморского происхождения в Черное море и сделать его застойным. Однако большинство исследователей отвергли эту гипотезу как противоречащую непосредственным наблюдениям, подтверждающим наличие высокосолёных вод на больших глубинах Черного моря [Толмазин, 1962; Андрианова и др. 2019]. Естественно, что какое-то влияние на водообмен Черного моря с Мраморным он оказывает, но не столь драматичное [Суховой и др., 2012].

Цель работы состояла в исследовании динамики температуры и солености поверхностного слоя черноморской воды на прибосфорском шельфе и в проливе Босфор, через который она поступает в Мраморное море, а также оценке особенностей широтного распределения и сезонной из-

менчивости этих характеристик на рассматриваемых акваториях с выделением в них экстремумов (max и min) и определением времени их наступления по данным конкретных измерений в 1998—2000 гг.

Материалы и методы исследования.

Основой для проведения настоящих исследований явились данные непрерывной регистрации температуры и солености поверхностного слоя морской воды, полученные на ходу судна в течение 164 коммерческих рейсов по маршруту Одесса—Стамбул и обратно в течение 30 месяцев (с 3.05.1998 по 25.10.2000 г.) научно-исследовательским судном «Георгий Ушаков», который был оснащен стационарной системой непрерывной регистрации термохалинных параметров. Эта система была реализована на базе зондирующего STD-комплекса «Катран», а суть ее состояла в том, что первичные измерительные преобразователи температуры и удельной электропроводности (солености) морской воды (датчики) зондирующего комплекса были установлены во входном кингстоне забортной воды судна, используемом для охлаждения главного двигателя. Отверстие системы было расположено в борту судна на глубине 2—3 м от поверхности моря. Информация от датчиков опускного устройства, помещенных в кингстоне, обрабатывалась бортовым блоком комплекса в лаборатории и сохранялась в виде ряда координат и текущих параметров в физических величинах [Северо-западная ..., 2016].

Для получения среднемесячных и среднегодовых величин и оценок сезонной изменчивости было проведено осреднение по месяцам результатов регистрации данных температуры и солености воды на поверхности (164 съемок) в интересующих нас регионах: в проливе Босфор 41,00—41,25° с.ш. и на черноморском шельфе 41,26—41,50° с.ш. Съемки располагались квазимеридионально, поэтому анализировалось широтное распределение вдоль меридиана 29° в. д. При месячном осреднении обобщалось, как правило, 5—6 съемок (до 7—9 съемок в месяц). Однако за анализируемый период с 3 мая 1998 г. по 25 октября 2000 г. в пяти случаях

имели место пропуски в наблюдениях более одного месяца (от 32 до 42 дней) и в трех случаях более 20 дней (25—26 дней). В таком случае вопрос с пропусками решался путем расчетного нахождения средних из данных последней до пропуска и первой после пропуска съемки. Пропуски в наблюдениях (съемках) были связаны с необходимостью проведения профилактического ремонта судна. Отсутствующие наблюдения по месяцам были заменены их средними величинами, как это применяется в гидрометеорологической практике. В нашем случае пропущенные данные по температуре и солености поверхностного слоя воды за ноябрь—декабрь 2000 г. были заменены их средними значениями, вычисленными за соответствующие месяцы 1998 и 1999 гг. Аналогичная операция проведения подобных расчетов была применена и для восстановления отсутствующих в 1998 г. января—апреля месяцев по соответствующим месяцам 1999 и 2000 гг.

Подготовленная программа позволила обобщить полученные материалы фактических съемок с месячной временной дискретностью и частотой измерения (регистрации) параметров температуры и солености воды через 0,01° широты, что в переводе в метрическую систему равнозначно примерно одному километру (0,01° ш. = 1111,2 м).

Результаты исследований и их анализ.

Приступая к анализу результатов расчета среднемесячных значений поверхностной температуры и солености воды в проливе Босфор и на черноморском шельфе, полученных обобщением и осреднением данных по годам и за все три года (1998—2000 гг.), обратимся к приведенной таблице. В ней представлены сведения о температуре и солености воды на всей поверхности шельфа и пролива Босфор за три года, их средние и экстремальные значения. Межгодовые колебания по температуре не превышали 1,04 °С, а по солености — 0,51 ‰. При этом замечено, что, как правило, температура воды на шельфе выше, чем в проливе, а соленость, наоборот, ниже, чем в проливе, и это объясняется, по нашему мнению, существованием в проливе процессов интен-

Обобщенные по среднемесячным данным среднегодовые значения температуры и солености поверхностного слоя воды в проливе Босфор и на черноморском шельфе, величины экстремальных значений этих характеристик по годам и месяцам их наступления, а также средние за 3 года

Годы	t_w ср., ГОД	t_w min	Месяц	t_w max	Месяц	$S_{ср.}$, ‰, ГОД	S_{min} , ‰	Месяц	S_{max} , ‰	Месяц
В проливе Босфор										
1998	14,28	6,64	Февраль	23,35	Август	17,36	16,88 16,88	Июль— октябрь	18,03	Март
1999	16,10	6,11	То же	24,88	То же	17,32	15,44	Июль	18,48 18,00	Декабрь— март
2000	15,23	7,15	»	24,72	»	17,75	17,35 17,25	Август— октябрь	17,93	Февраль
Средние за 3 года	15,20	—	—	—	—	17,48	—	—	—	—
На черноморском шельфе										
1998	15,22	6,73	Февраль	24,91	Июль	17,31	17,00 16,92	Июнь— октябрь	17,75	Март
1999	15,32	6,30	То же	25,67	Август	17,24	15,26	Июль	17,80 17,77	Декабрь— февраль
2000	15,82	7,13	»	25,61	То же	17,56	17,12 16,87	Август— октябрь	17,93	Февраль
Средние за 3 года	15,45	—	—	—	—	17,37	—	—	—	—

сивного перемешивания встречающихся здесь вод, имеющих заметные различия в величинах характеристик.

Наряду с приведенными оценками общих средних величин температуры и солености поверхностного слоя морской воды, наблюдаемых в каждом из анализируемых регионов (в проливе и на шельфе), подробнее рассмотрена изменчивость их широтного распределения с дискретностью через $0,01^\circ$ ш. при том же трехлетнем их осреднении (рис. 1). В первом приближении вид этих кривых в проливе имеет зеркальный характер. Как уже упоминалось, температура черноморской воды по мере своего продвижения через пролив в Мраморное море непрерывно понижается, а соленость, наоборот, повышается. Природа этого явления — процесс интенсивного перемешивания встречающихся в самом проливе разнородных вод. Кроме того, из-за заметного уменьшения глубины пролива в его южной части (до 40 м и наличие порога с глубиной 36 м в 13 км к северу от южного входа в него) интенсивность перемешивания здесь резко возрастает, а зеркальный вид хода рассматриваемых кривых на графике пред-

ставляет собой противоположно направленные экспоненты. Как следует из формы кривых температуры и солености воды в районе пролива Босфор (см. рис. 1), по достижению порога процесс из медленного (скорость изменения по температуре и солености, соответственно $0,5^\circ\text{C}$ и $1,1\text{‰}$ на 1 градус широты) превращается в лавинообразный (со скоростью $5,9^\circ\text{C}$ и $6,4\text{‰}$).

Приводя численные значения температуры и солености воды на шельфе до входа в пролив по осредненным за три года данным (см. рис. 1), можно отметить, что в крайней северной точке ($41,50^\circ$ с. ш.) нашего исследования, условно принятой за северную границу шельфа, их величины были равны соответственно $15,70^\circ\text{C}$ и $17,48\text{‰}$ и были наиболее близки к среднемноголетним их значениям в открытых водах этого региона моря. Так, например, в работе [Ильин, 2016], обобщенные за ряд лет среднегодовые величины температуры и солености черноморской воды, находящейся на шельфе Босфора, были равны соответственно $16,11^\circ\text{C}$ и $17,39\text{‰}$. По мере продвижения ко входу в пролив наблюдалось небольшое понижение величин обеих характеристик; на входе в пролив (на $41,25^\circ$ с. ш., принятой нами за его северную границу) их значения составили: температура воды $15,59^\circ\text{C}$ и соленость $17,14\text{‰}$. Важно заметить, что выполненный в работе [Ильин, 2016] анализ данных длительных временных рядов наблюдений над соленостью воды на поверхности на прибрежных станциях всего северного Причерноморья указывает на присутствие в них отрицательного временного тренда. На станции Одесса, например, за 60 лет (с 1951 по 2011 гг.) соленость волнообразно понизилась на величину более 1‰ (с 15 до $13,9\text{‰}$). Ранее было показано, что аналогичный отрицательный тренд присутствует не только на поверхности на прибрежных станциях, но и во всей 300-метровой толще вод Черного моря [Андреанова и др., 2019]. Лишь с глубины 400 м и уже до дна он сменяется на положительный. Поэтому проводимое сравнение данных, осредненных за различные временные интервалы, не совсем корректно.

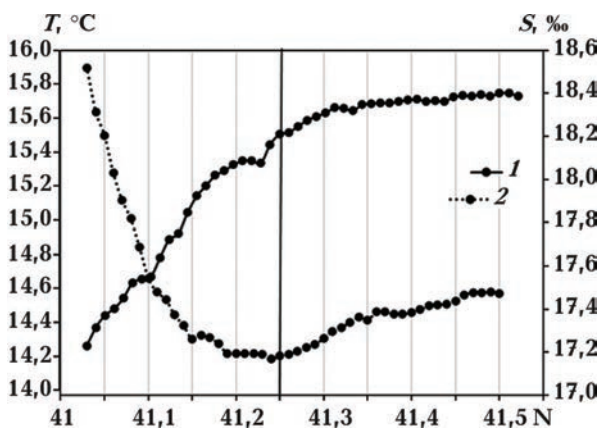


Рис. 1. Широтное распределение осредненных за 1998—2000 гг. значений температуры (1) и солености (2) поверхностного слоя воды на черноморском шельфе и в проливе Босфор ($41,25^\circ$ с. ш. — граница между ними).

Fig. 1. The latitudinal distribution of the temperature (1) and salinity (2) of the surface water layer averaged over the 1998—2000 years on the Black Sea Shelf and in the Bosphorus Strait ($41,25^\circ$ N is the boundary).

В результате проведенных исследований было установлено, что на протяжении всего рассмотренного периода наблюдений (1998—2000 г.) соленость поверхностного слоя воды у входа в пролив Босфор характеризовалась минимальными ее значениями. Этот феномен можно объяснить фактом постоянного присутствия здесь вдольберегового течения, существующего у северного побережья Турции и имеющего несколько пониженные значения солености. Из сделанного заключения следует, что в первую очередь воды прибрежного течения поступают в пролив Босфор, а не из открытых акваторий шельфа. Меридиональная ширина этого течения по нашим предварительным оценкам колебалась в пределах до 10 км (увеличиваясь в отдельных случаях до 20 км).

Анализ средних характеристик температуры и солености поверхностного слоя черноморской воды, поступающей из пролива Босфор в Мраморное море, при том же трехлетнем их осреднении показал, что на выходе из пролива (на широте $41,03^\circ$ с. ш.) они принимают значения, равные соответственно $14,13^\circ\text{C}$ и $18,58\text{‰}$. Эти значения определяются интенсивно развитым процессом перемешивания черноморских вод, текущих на юг поверхностным потоком через пролив в Мраморное море, с встречающимися здесь и текущими на север в придонном слое водами со средиземноморскими характеристиками. Из полученных результатов можно заключить, что в среднем, проходя через пролив, черноморская вода понижает свою температуру почти на $1,5^\circ\text{C}$ ($1,46^\circ\text{C}$) и повышает свою соленость на такую же величину $1,5\text{‰}$ ($1,44\text{‰}$).

Наряду с изложенным освещением особенностей распределения температуры и солености поверхностного слоя воды в проливе Босфор и на его черноморском шельфе была оценена сезонная изменчивость этих характеристик по тем же среднемесячным значениям, осредненным за три года (1998—2000 гг.). При этом была рассмотрена сезонная изменчивость температуры и солености как осредненная по широте (рис. 2), так и вычисленная и по-

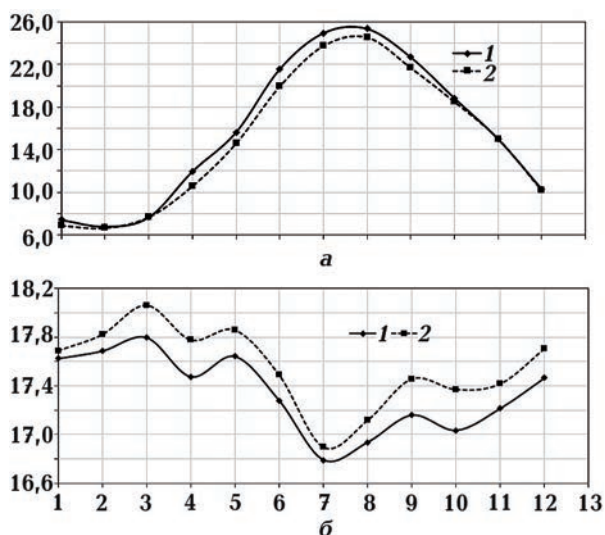


Рис. 2. Сезонный ход осредненных по широте за 1998—2000 гг. среднемесячных значений температуры (а) и солености (б) поверхностного слоя воды на черноморском шельфе (кривая 1) и в проливе Босфор (кривая 2).

Fig. 2. The seasonal variation of the averaged over the latitude the monthly average temperature (a) and salinity (b) of the surface water layer on the Black Sea shelf (curve 1) and in Bosphorus Strait (curve 2) for 1998—2000 years.

строенная по месяцам с подробной широтной дискретностью ($0,01^\circ$ ш.) (рис. 3).

Сезонный ход среднемесячных значений температуры поверхностного слоя воды на шельфе и в проливе (см. рис. 2, а), осредненных по широте за три года, характеризуется плавным ростом в первую половину года и таким же плавным падением во вторую половину. Вследствие существующего в проливе процесса смешения вод сезонный ход температуры воды в нем (см. рис. 2, а, кривая 2) проходит на более низком фоне по сравнению с шельфовой зоной (см. рис. 2, а, кривая 1). В летний период максимальная температура воды на шельфе и в проливе наблюдалась в августе и характеризовалась значениями, соответственно равными $25,27$ и $24,34^\circ\text{C}$. В зимнее время минимальные значения температуры воды в обоих упомянутых районах наблюдались в феврале и характеризовались величинами, равными соответственно $6,72$ и $6,63^\circ\text{C}$. Обращает на себя внимание тот факт, что в летнее время максимум темпе-

ратуры воды в проливе был почти на 1°C ниже, чем на шельфе, в то время как зимой эта разность составила всего $0,1^{\circ}\text{C}$. Амплитуда сезонных колебаний температуры воды по осредненным за три года данным на шельфе была равна $18,55^{\circ}\text{C}$, а в проливе $17,62^{\circ}\text{C}$.

Особенности сезонного хода солёности поверхностного слоя воды на шельфе и в проливе Босфор по среднемесячным данным (см. рис. 2, б), осредненным в каждом из них по широте за три года (1998—2000 гг.), характеризовались более сложным видом по сравнению с сезонным ходом температуры воды на поверхности (см. рис. 2, а). В сезонной изменчивости солёности черноморской воды, находящейся на шельфе (см. рис. 2, б, кривая 1), прослеживается хорошо выраженная полугодовая цикличность в ее годовом ходе, которая характеризуется наличием основного и вторичного экстремумов. Основной экстремум, имеющий типичный зимний максимум, наблюдается в

феврале (солёность $17,80\text{‰}$), а летний минимум (солёность $16,73\text{‰}$) в июле после весеннего паводка рек (см. рис. 2, б, кривая 1). Амплитуда колебаний в основном экстремуме составляет $1,07\text{‰}$. Вторичный экстремум на шельфе, максимум которого (солёность $17,35\text{‰}$) наблюдается в сентябре, а минимум (солёность $17,16\text{‰}$) в октябре, незначителен по амплитуде (всего $0,2\text{‰}$), хотя наблюдается в двух из трех рассмотренных лет. Его природа не совсем ясна и требует дополнительного исследования. Причин для появления вторичного экстремума на шельфе Босфора, по нашему мнению, может быть несколько: это, прежде всего, неясный характер сезонного хода солёности прибрежного течения; существование летнего паводка на реках Кавказа; возможное появление вторичных летне-осенних паводков на реках северо-западного региона Черного моря; и, наконец, развитие такого характера циркуляции вод в юго-западной части Черного моря под

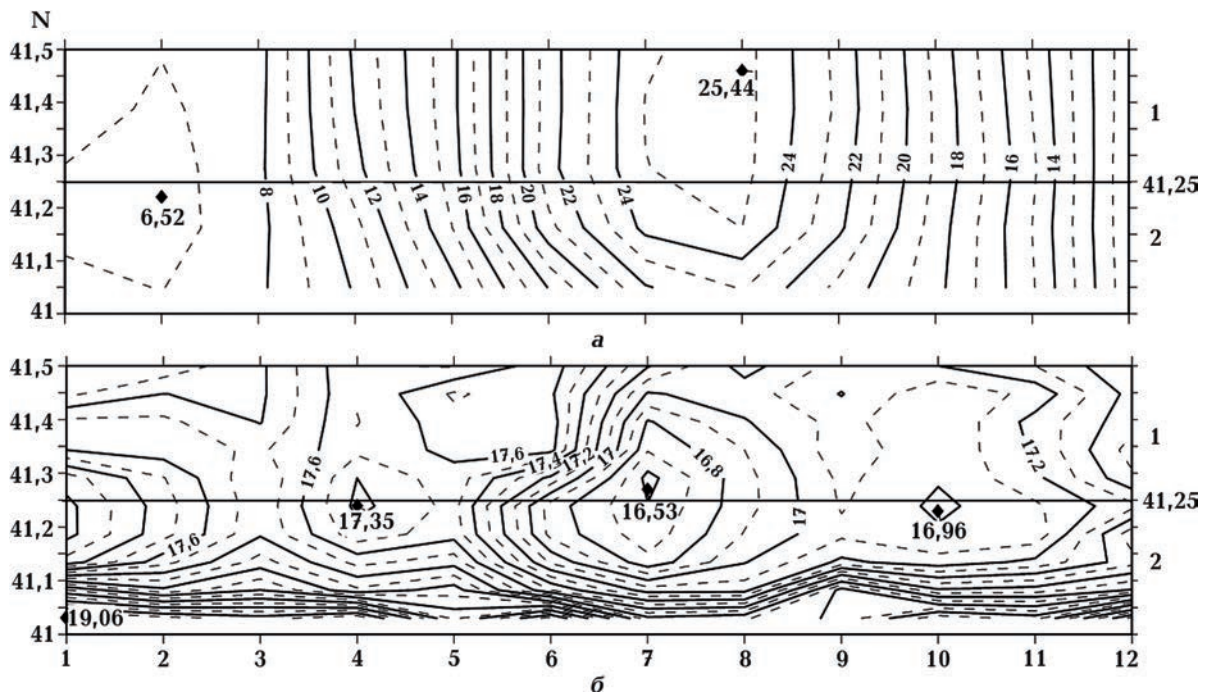


Рис. 3. Графики сезонного хода осредненных за 1998—2000 гг. температуры (а) и солёности (б) поверхностного слоя воды на черноморском шельфе (1) и в проливе Босфор (2) с границей между ними по $41,25^{\circ}$ с. ш.

Fig. 3. The seasonal variation of temperature (a) and salinity (b) of the surface water layer, averaged over the 1998—2000 years on the Black Sea Shelf (1) and in the Bosphorus Strait (2) ($41,25^{\circ}$ N is the boundary).

влиянием атмосферных процессов, которая способствует поступлению части распресненных вод в предпроливный район Босфора.

Анализ сезонной изменчивости солености воды в проливе Босфор по среднемесячным данным, осредненным по широте за три года (см. рис. 2, б, кривая 2), показал, что процесс активного перемешивания разнородных вод приводит к исчезновению вторичного экстремума, который наблюдается на шельфе, а основной зимний (февральский) максимум на шельфе для пролива смещается на март месяц и составляет 18,05 ‰. Основной летний минимум солености в проливе, как и на шельфе, наблюдается в июле и равен 16,95 ‰ (см. рис. 2, б). Амплитуда сезонных колебаний солености в проливе в среднем за три года составляет 1,10 ‰.

На основании подробного (с дискретностью $0,01^\circ$ ш.) сезонного хода температуры воды на поверхности шельфа, приведенного на сводном графике (см. рис. 3, а, зона 1) и в проливе Босфор (см. рис. 3, а, зона 2) с границей между ними, проходящей по $41,25^\circ$ с. ш., которая делит график на две примерно равные части (меридиональная протяженность шельфа 27,8 км, а пролива 24,4 км), можно констатировать синхронный во времени характер прогревания или охлаждения в течение года поверхностного слоя воды на акватории шельфа (изотермы простираются меридионально) и нарушенный их вид в проливе вследствие развитого в нем процесса перемешивания вод (см. рис. 3, а, зона 2).

Еще выразительнее отмеченные особенности проявляются в сезонном ходе солености поверхностного слоя воды как на шельфе, так и в проливе (см. рис. 3, б). На приведенном сводном графике сезонного хода солености поверхностного слоя воды можно отметить, что на шельфе (см. рис. 3, б, зона 1) в годовом цикле прослеживается хорошо выраженная цикличность смены более соленых вод на менее соленые, и наоборот. Это особенно рельефно выражено на границе стыка вод шельфа и пролива (район $41,25^\circ$). Так, между водами с соле-

ностью 17,5 ‰ в марте и мае в апреле появляются воды с соленостью ниже 17,4 ‰ (17,35 ‰), в октябре отмечено появление вод с соленостью ниже 17,0 ‰ (16,96 ‰) между сентябрьскими и ноябрьскими водами с соленостью 17,0 и 17,2 ‰, соответственно. И, наконец, необходимо указать на приход в июле к проливу распресненных вод с соленостью ниже 16,6 ‰ (16,53 ‰). Такие особенности распределения солености в поверхностном слое воды на границе шельфа и пролива являются дополнительным подтверждением высказанной гипотезы о существовании у северного побережья Турции в районе входа в пролив Босфор вдольберегового течения.

Другой, заслуживающей внимания особенностью не только сезонной, но и общей изменчивости солености поверхностного слоя воды в проливе Босфор является процесс интенсивного перемешивания с идущими навстречу в придонном слое высокосолеными водами средиземноморского происхождения. Об этом ярко свидетельствует зональное распределение изохалин на графике (см. рис. 3, б, зона 2) в южной части пролива Босфор.

Заключение. Проведенные исследования особенностей широтного распределения и сезонной изменчивости температуры и солености поверхностного слоя черноморской воды на прибофорском шельфе и в проливе Босфор по данным конкретных измерений в 1998—2000 гг. позволили получить их современные оценки: на рассматриваемых акваториях средние величины составили соответственно $15,45^\circ\text{C}$; 17,37 ‰ и $15,20^\circ\text{C}$; 17,48 ‰. Сопоставление полученных результатов с литературными сведениями показало их согласованность как с климатическими средними значениями, вычисленными для поверхностного слоя всего Черного моря (температура $14,87^\circ\text{C}$, соленость 17,45 ‰) [Иванов, Белокопытов, 2011], так и отдельно для района прибофорского шельфа (соответственно $16,11^\circ\text{C}$ и 17,39 ‰) [Ильин, 2016].

В проливе Босфор отмечено своеобразное широтное распределение температуры и солености поверхностного слоя воды (см.

рис. 1). Если на шельфе в их изменчивости доминировал климатический фактор (изотермы имеют здесь меридиональную направленность), то в проливе эту роль перехватывает динамический фактор, а именно процесс интенсивного перемешивания встречающихся здесь вод с существенно различающимися термохалинными характеристиками. Физически процесс перемешивания выглядит следующим образом: черноморская вода, поступив в пролив, начинает медленно перемешиваться со средиземноморской водой в придонном слое. Однако по достижению порога процесс из медленного (со скоростью изменения по температуре и солёности соответственно $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1,1\text{ }‰$ на 1° ш.) превращается в лавиноподобный (со скоростью $5,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $6,4\text{ }‰$ на 1° ш.). Отсюда и форма представленных на рис. 1 кривых температуры и солёности воды в проливе Босфор. Установлено, что, проходя через пролив, черноморская вода понижает свою температуру на $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и повышает солёность на $1,5\text{ }‰$.

Сезонный ход температуры воды в проливе протекает на фоне более низких ее значений, чем на шельфе (см. рис. 2, а), что объяснимо включением их в процесс перемешивания со встречными более холодными, но солёными водами. В годовом ходе солёности поверхностного слоя воды обнаружено существование на шельфе двух экстремумов, названных нами основным и вторичным (см. рис. 2, б, кривая 1). Поступившие в пролив Босфор (см. рис. 2,

б, кривая 2) воды в результате происходящего в нем процесса смешения теряют вторичный экстремум солёности.

Установлено круглогодичное присутствие вод с пониженной солёностью на стыке шельфа и пролива (по широте $41,25^{\circ}$ с. ш.), что может объясняться существованием прибрежного течения, распространяющегося узкой полосой вдоль северного побережья Турции, в результате чего в пролив поступают в первую очередь воды прибрежного течения, а не из открытых акваторий шельфа. Меридиональная ширина этого течения по нашим предварительным оценкам колебалась в пределах от 0 до 10 км (увеличиваясь в отдельных случаях до 20 км).

Таким образом, исследование динамики изменений термохалинных параметров в районе пролива Босфор показали особенности их широтного распределения и сезонной изменчивости. Полученную информацию о процессах и их закономерностях можно в дальнейшем использовать для моделирования изменчивости гидрофизических полей в этом регионе. Для уточнения динамики процессов как в Черном море, так и в проливе Босфор и получения более подробных сведений о влиянии поступающих вод на изменения пространственно-временной структуры термохалинных полей рекомендуется привлечение актуальной информации, включающей в себя не только гидрофизические характеристики, но и гравитационные, магнитные и сейсмические наблюдения в данном регионе.

Список литературы

- Андрианова О.Р., Белевич Р.Р., Скипа М.И. Мраморноморские воды средиземноморского происхождения в формировании полей солёности и динамики в Черном море. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41. № 5. С. 235—249. <http://doi.org/10.24028/gzh.0203—3100.v41i5.2019.183639>.
- Богданова А.К. Сезонные и межгодовые колебания водообмена через Босфор. В кн.: *Биология моря*. Киев: Наук. думка, 1972. С. 41—54.
- 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.
- 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, НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. 213 с.

Ильин Ю.П. Климатические изменения гидрометеорологического режима морей Украины: Дис. ... д-ра географ. наук. Киев, 2016. 380 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.

Северо-западная часть Черного моря: структура и климатические изменения океанологических полей. Отв. ред. А.С. Матыгин, Г.Ю. Коломейченко. Одесса: Изд. Букаев Вадим Викторович, 2016. 439 с.

Толмазин Д.М. Поле течений и обмен вод в Босфоре. *Океанология*. 1962. Т. 2. Вып. 1. С. 44—50.

Features of the dynamics of the surface water layer temperature and salinity in the Bosphorus Strait and on its Black Sea Shelf

R.R. Belevich, O.R. Andrianova, A.A. Batyrev, M.I. Skipa, 2020

SI «Hydroacoustic Branch of S.I. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine», Odessa, Ukraine

According to the data of continuous record during the vessel movement of water temperature and salinity of the surface layer on the Black Sea Shelf of the Bosphorus and in the strait for 1998—2000, their average three-year values were calculated: 15.45 °C; 17.37 ‰ and 15.20 °C; 17.48 ‰, and their latitudinal distribution and seasonal course were estimated. Specific latitudinal distribution of temperature and salinity of surface water layer have been noticed: isolines on the shelf are meridional because of climatic factor dominance; in the straight thermohaline characteristics differ essentially as a result of dynamic factor — the process of mixing of water, which meet here. The Black Sea water coming to the straight begins its slower mixing with the Mediterranean Sea water in its near-bottom layer but after reaching the threshold the process from the slow one (velocity of temperature and salinity changes 0.5 °C and 1.1 ‰ per 1 degree of latitude accordingly) transforms into avalanche-like (with velocity 5.9 °C and 6.4 ‰ per 1 latitudinal degree), that determines the features of temperature and salinity distribution in the water of the Bosphorus Strait. It has been found that the Black Sea water coming through the straight lowers its temperature per 1.5 °C and rises its salinity per 1.5 ‰. The seasonal course of water temperature in the channel is lower than on the shelf. Presence of two extremes (primary and secondary) were detected in a year course of water on the shelf as a result of mixing process in the Bosphorus Strait the added water loses the secondary extreme of salinity. The year-round presence of low salinity waters is detected at the junction of the shelf and the channel (latitude 41.25°N), which is explained by the influence of up to 10 km wide coastal current along the northern coast of Turkey. As a result, the water comes primarily from the coastal current, not from the open shelf waters.

Key words: Black Sea, Bosphorus Strait, temperature, salinity, latitudinal distribution, seasonal variation, average values, extremes.

References

- Andrianova, O.R., Belevich, R.R., & Skipa, M.I. (2019). Marmara Sea waters with the Mediterranean origin in the formation of the salinity and dynamics fields in the Black Sea. *Geofizicheskiy zhurnal*, 41(5), 235—249. <http://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183639> (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).
- 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 doctrine 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: Ed. 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).
- 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. *Ukrayinskyi hidrometeorologichnyy zhurnal*, (10), 217—225 (in Russian).
- Matygin, A.S., & Kolomeychenko, G.Yu. (Eds.). (2016). *Northwest part of the Black Sea: structure and climatic changes of oceanological fields*. Odessa: Bukayev Vadim Viktorovich [PH]. 439 p. (in Russian).
- Tolmazin, D.M. (1962) Field of currents and water exchange in the Bosphorus. *Okeanologiya*, 2(1), 44—50 (in Russian).

Особливості динаміки температури і солоності поверхневого шару води в протоці Босфор і на його чорноморському шельфі

Р.Р. Белевич, О.Р. Андріанова, О.А. Батирев, М.І. Скіпа, 2020

ДУ «Відділення гідроакустики Інституту геофізики ім. С.І. Субботина НАН України», Одеса, Україна

За даними безперервної реєстрації по ходу судна температури і солоності поверхневого шару води на чорноморському шельфі протоки Босфор і в самій протоці за середньомісячними значеннями за 1998—2000 рр. розраховано середні за три роки їх значення — відповідно 15,45 °C; 17,37 ‰ та 15,20 °C; 17,48 ‰, а також оцінено їх широтний розподіл і сезонний хід. Виявлено своєрідний широтний розподіл температури і солоності поверхневого шару води: на шельфі ізолінії мають меридіональну спрямованість, оскільки в їх мінливості домінував кліматичний фактор; у протоці термохалінні характеристики істотно різняться в результаті дії динамічного фактора — процесу перемішування вод, що зіткнулись. Чорноморська вода з надходженням у протоку повільно змішується із середземноморською водою у придонному шарі. Досягнувши порогу, процес з повільного (зі швидкістю зміни за температурою і солоністю, відповідно, 0,5 °C і 1,1 ‰ на 1 градус широти) перетворюється на лавиноподібний (зі швидкістю 5,9 °C і 6,4 ‰ на 1 градус широти), що визначає особливості розподілу температури і солоності води в протоці Босфор. Установлено, що внаслідок проходження через протоку чорноморська вода у середньому знижує свою температуру на 1,5 °C і підвищує солоність на 1,5 ‰. Сезонний хід температури води в протоці має нижчі значення, ніж на шельфі. У річному ході солоності води на шельфі виявлено існування двох екстремумів (основного і вторинного), в результаті процесу змішування в протоці Босфор води, що надійшли, втрачають вторинний екстремум солоності. Встановлено цілорічну наявність вод зі зменшеною солоністю у районі стику шельфу і протоки (за широтою 41,25° с. ш.). Це пояснюється узбережною течією, що поширюється вузькою смугою вздовж північного узбережжя Туреччини. В результаті в протоку надходять насамперед води узбережної течії, а не з відкритих акваторій шельфу. Меридіональна ширина цієї течії за попереднім оцінюванням коливається до 10 км.

Ключові слова: Чорне море, протока Босфор, температура, солоність, широтний розподіл, сезонний хід, середні значення, екстремуми.