

Трансформация черноморских вод в Мраморном море

Анализ проводится на основе сопоставления гидрологических характеристик предпроливных областей Мраморного моря. Показано, что в летние месяцы черноморские воды слабо перемешиваются со средиземноморскими, соленость в предпроливных областях различается на 0,6–0,9 ‰. В зимние месяцы различие возрастает, соленость вблизи входа в пролив Дарданеллы достигает 29 ‰, превышая соленость у входа в Босфор на 5,5 ‰. В рассматриваемых областях вблизи границы раздела двух водных масс наблюдаются локальные температурные максимумы и минимумы, что обусловлено наличием сильной сезонной изменчивости температуры черноморских вод и отсутствием таковой у средиземноморских. Обсуждаются физические механизмы, определяющие сезонную изменчивость интенсивности трансформации черноморских вод.

Введение. Исследования, проведенные российскими учеными в конце девятнадцатого века, позволили определить основные черты гидрологии Мраморного моря [1,2]. Они были продолжены в первой половине двадцатого века [3], а также в современных работах [4, 5], тем не менее до настоящего времени остаются отдельные детали, нуждающиеся в уточнении.

Гидрология Мраморного моря формируется в результате обмена через два узких пролива, связывающих его с Эгейским и Черным морями. Существенные различия в солености Эгейского и Черного морей привели к образованию ярко выраженной двухслойной структуры. Верхний слой толщиной около 20 – 30 м занимают более легкие черноморские воды, нижний – тяжелые средиземноморские [4]. Высокий градиент плотности на границе двух водных масс затрудняет вертикальный обмен, в результате чего черноморские воды слабо перемешиваются с нижележащими средиземноморскими, и, как следствие, двухслойная структура наблюдается на всей акватории Мраморного моря.

Турецкая система проливов, в которую принято объединять проливы Босфор, Дарданеллы и Мраморное море [6], является важным элементом, определяющим гидрологию как Черного, так и Эгейского морей. Поступления черноморских вод хорошо прослеживаются в северной части Эгейского моря по данным дистанционного зондирования в ИК- и видимом диапазонах. Отмечается, что фронтальные зоны, разделяющие черноморские и средиземноморские водные массы, и их положение характеризуются сильной сезонной изменчивостью [7].

Массив гидрологических данных. Целью работы является анализ трансформации черноморских вод между проливами Босфор и Дарданеллы. Анализ проводится на основе информации, имеющейся в базе данных МГИ НАН Украины [8]. Данные получены в рамках международного океанографического проекта *MEDAR/MEDATLAS 2002* [9].

Анализируемый в настоящей работе гидрологический массив содержит данные о температуре и солености, полученные на 483 станциях. В основном

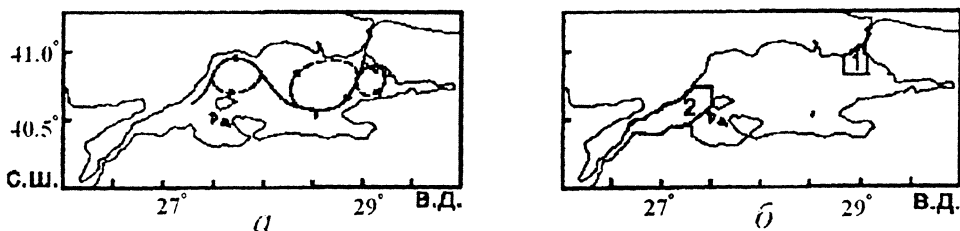
эти станции выполнены в период с 1948 по 1997 г. Массив данных очень неоднороден: на отдельных станциях измерения проводились только в поверхностном слое, на других – осуществлялись зондирования. Общее количество измерений температуры равно 32 195, солености – 32 143.

Пространственное распределение станций по акватории Мраморного моря довольно неоднородно. Наибольшее их число выполнено в северной части анатолийского свала глубин. Относительно небольшое число станций проведено в регионе западнее о. Мармара и южнее широты 40,6°с.ш. Количество станций по сезонам распределено следующим образом: зима – 109, весна – 159, лето – 154, осень – 61.

Описание некоторых результатов предварительного анализа используемого в настоящей работе массива данных представлено также в [10].

Основные черты циркуляции в верхнем слое Мраморного моря. Площадь Мраморного моря составляет 11500 км² [11]. Если принять, что черноморские воды равномерно распределены по всей акватории слоем толщиной 25 м, то их объем составит 288 км³. Это примерно в 1,5 – 2 раза меньше объема их годового поступления с верхним босфорским течением, которое по разным оценкам составляет от 400 км³ [12] до 600 км³ [13]. По оценкам, приведенным в работе [14], время обновления черноморских вод в Мраморном море составляет 4 – 5 мес.

Основные черты циркуляции в верхнем слое Мраморного моря следующие. Черноморские воды от Босфора в виде струйного потока движутся на юг, отклоняются на запад, а затем и на северо-запад. Достигнув европейского берега, течение поворачивает в направлении к проливу Дарданеллы. По обе стороны от этой струи образуются вихри как циклонического, так и антициклонического типа (рис. 1, а из работы [5]). Эти образования хорошо прослеживаются на картах уровня. Их также можно наблюдать в распределениях поверхностной температуры и солености. Описанная структура циркуляции более четко выражена в весенние и летние месяцы, когда разность уровня в Черном и Мраморном морях максимальна и соответственно максимально поступление воды через Босфор [15].



Р и с. 1. Схема циркуляции в верхнем слое Мраморного моря из работы [5] (а) и границы регионов № 1 и 2 (б)

Как отмечено в [5], расположение большого антициклонического вихря в центральной части моря несколько меняется в течение года, в отдельные месяцы он смещается на запад. Вихри меньших размеров перманентно появляются и исчезают. Все отмеченные вихри проявляются в относительно тонком

слое. Как следствие, распределение солености и температуры ниже галоклина резко отличается от их распределений в приповерхностном слое.

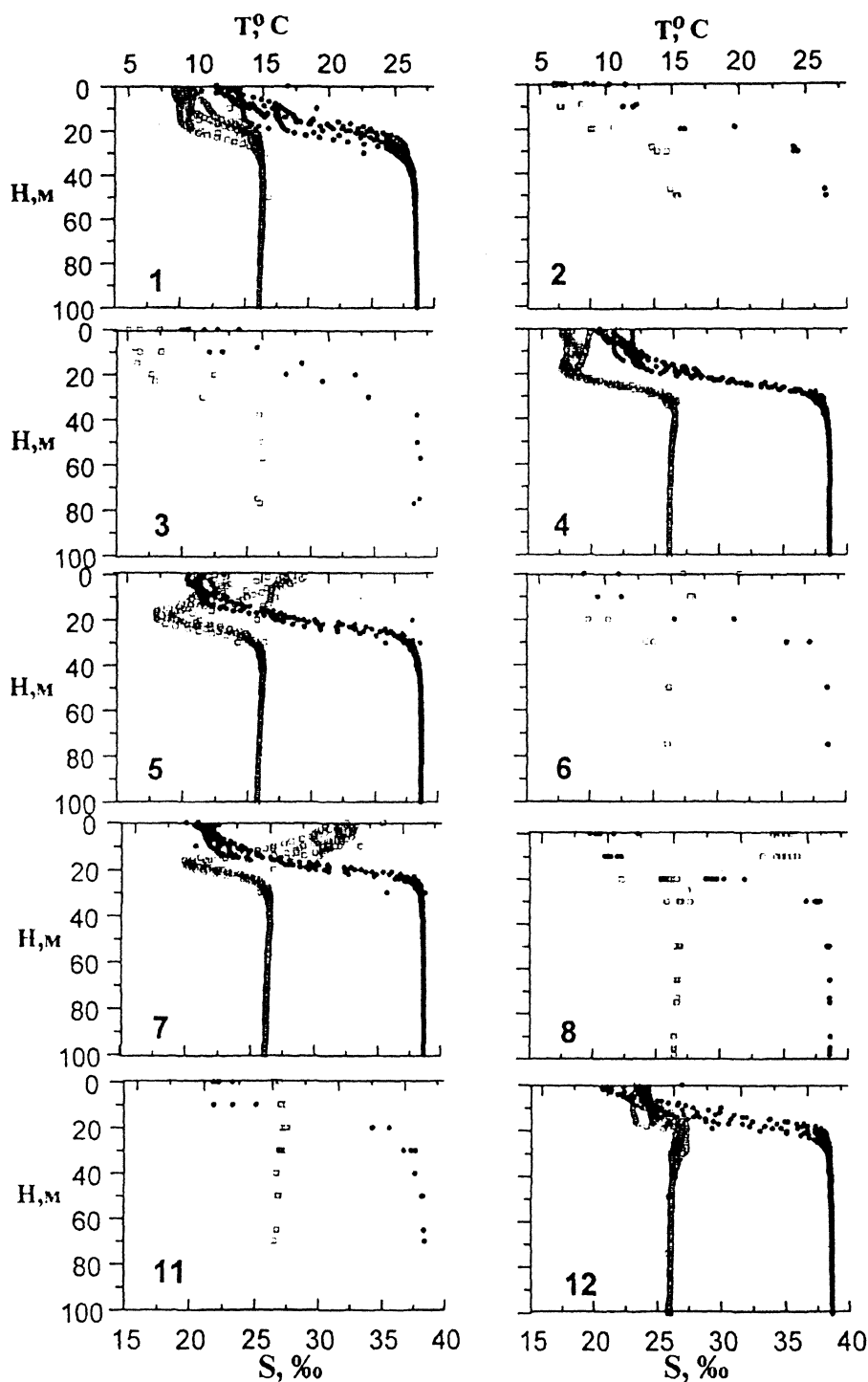
Сложная пространственная структура распределения солености и температуры затрудняет анализ трансформации черноморских вод в Мраморном море. Поэтому анализ будем проводить путем сопоставления характеристик предпроливных областей. Были выделены два региона, границы которых показаны на рис. 1, б. Анализ начнем с прибосфорской области, которая обозначена как регион № 1.

Гидрологические характеристики прибосфорского района. Поступающие с верхним босфорским течением черноморские воды характеризуются хорошо выраженным сезонным ходом температуры. Среднемесячная температура воды $\bar{T}$ в приповерхностном слое региона № 1 достигает своего минимума, равного 6°C , в феврале. Максимальные значения наблюдаются в августе и равняются $23,5^{\circ}\text{C}$. Значения $\bar{T}$ рассчитывались как средние по полученным в разные годы значениям температуры на горизонтах 0 – 3 м для заданного месяца. Если сравнить эти значения $\bar{T}$ с аналогичными, определенными для всей акватории Мраморного моря, то можно отметить следующее. Достижение температурой экстремальных значений совпадает по времени, но величины несколько отличаются. Минимальная температура в прибосфорском районе ниже средней по всей акватории на $1,5^{\circ}\text{C}$, максимальная – ниже на $0,5^{\circ}\text{C}$ [10].

Наиболее высокие значения среднемесячной солености $\bar{S}$ наблюдаются в ноябре – январе, они лежат в пределах от 22,5 до 23,8 ‰. В остальные месяцы – $20,5 < \bar{S} < 21,9$ ‰.

Температура и соленость средиземноморских вод практически не имеют сезонной изменчивости. На горизонте 40 м температура изменяется в пределах $14,9 - 15,2^{\circ}\text{C}$; на 100 м – в пределах $14,6 - 14,7^{\circ}\text{C}$. Как видно из рис. 2, ниже 40 м имеет место слабое понижение температуры. Соленость на горизонте 40 м лежит в диапазоне $38,20 - 38,55$ ‰; на 100 м – в диапазоне $38,60 - 38,65$ ‰.

Сочетание сильной сезонной изменчивости температуры черноморских вод и отсутствия таковой у средиземноморских приводит к формированию сложных вертикальных структур. Эти структуры характеризуются наличием подповерхностных максимумов и минимумов, а также инверсий. В период с мая по август отмечается существование подповерхностного минимума температуры, который расположен вблизи горизонта 25 м. Наиболее высокие различия температуры поверхностного слоя и подповерхностного минимума имеют место в июле – августе, когда они могут достигать 14°C . В зимние месяцы вблизи горизонта 20 м иногда наблюдается локальный максимум температуры, в котором ее значения могут достигать 16°C .



Р и с. 2. Вертикальные профили температуры и солёности в прибоисфорском районе: солёность – •, температура – □; в левом нижнем углу указан номер месяца

Гидрологические характеристики у северного входа в пролив Дарданеллы. Большая часть информации о гидрологических характеристиках Мраморного моря, которая содержится в базе данных МГИ, относится к его восточной части. Для повышения обеспеченности оценок температуры и солености небольшое число гидрологических станций непосредственно у северного входа в пролив Дарданеллы компенсировано увеличением размеров региона № 2.

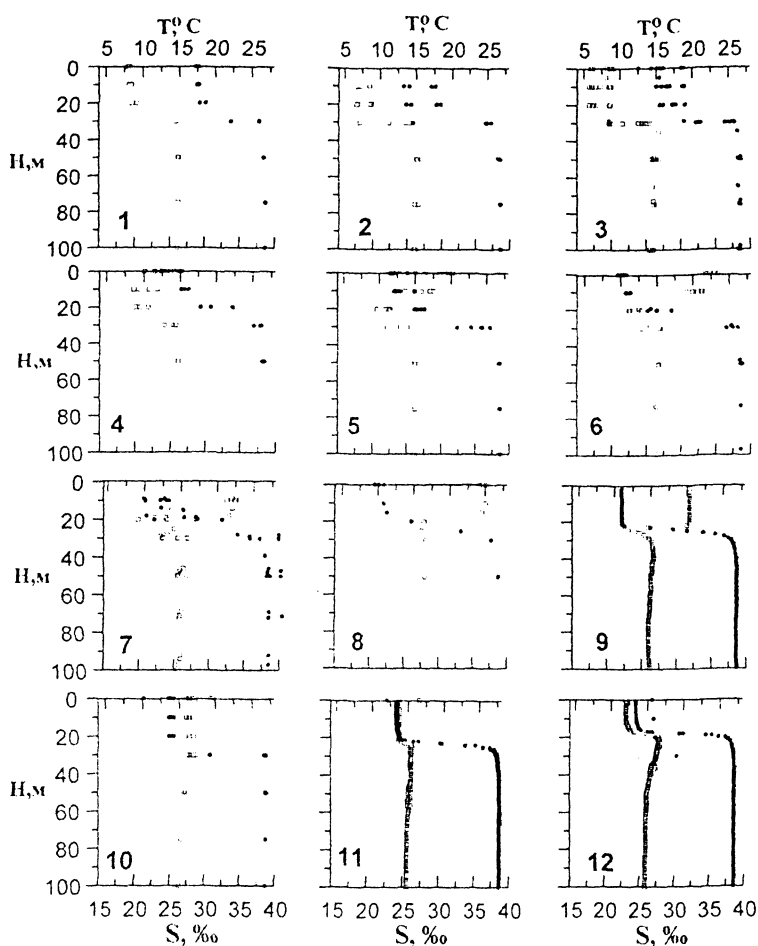
Сезонные изменения солености в верхнем слое региона № 2, в отличие от прибофорского района, хорошо выражены. По времени появления максимальных и минимальных значений солености $\bar{S}$ в двух предпроливных областях совпадает. Наиболее высокие значения солености в регионе № 2 наблюдаются в январе, когда $\bar{S}$ достигает 29 ‰. В период с июня по сентябрь соленость имеет наиболее низкие значения (около 22 ‰). Средние значения солености в регионе № 2 в течение всего года выше, чем в регионе № 1. Разность между значениями средней солености ΔS в этих двух регионах максимальна в январе – марте, когда она превышает 5 ‰, и минимальна в июне – августе, когда она составляет от 0,6 до 0,9 ‰.

Более высокие в зимний период значения ΔS являются следствием нескольких факторов. Во-первых, в летний период в результате прогрева верхнего слоя повышается вертикальная устойчивость и, как следствие, уменьшается вертикальный обмен. Во-вторых, имеет место сезонная изменчивость объема поступлений вод из Черного моря. Третий фактор связан с динамикой поверхностных волн. Относительно небольшая толщина верхнего слоя, сравнимая с длиной энергонесущих поверхностных волн, делает его чувствительным к волновому перемешиванию. В зимний период чаще наблюдаются штормы. По данным работы [16], в это время года часто регистрируются сильные ветры со скоростями 8 – 25 м/с, продолжительностью около 16 ч, что и приводит к более интенсивным процессам вертикального обмена в верхнем слое.

В работе [5] при анализе модели циркуляции в Мраморном море указывается, что роль солености более значительна, чем роль температуры, поскольку больше вклад солености в распределения плотности. Проведенный нами анализ показывает, что температура может оказывать более заметное, чем предполагается в [5], влияние на поле плотности. Как отмечено выше, это влияние реализуется через усиление или ослабление вертикального обмена.

Сравнивая рис. 2 и рис. 3, можно отметить, что характерные особенности вблизи границы раздела двух водных масс, присущие профилям температуры в прибофорском районе, наблюдаются и в регионе № 2. К таким особенностям относится появление локальных минимумов и максимумов. Заглубления или подъема границы раздела водных масс не наблюдается. Этот результат согласуется с данными измерений, полученными в 1988 – 1989 гг. [17] на трех разрезах между проливами.

Сезонный ход температуры приповерхностного слоя в регионе № 2 близок к сезонному ходу в прибофорском районе. Максимальные значения среднемесячной температуры ($\bar{T} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдаются в августе, минимальные ($\bar{T} = 7^{\circ}\text{C}$) – в феврале – марте.



Р и с. 3. Вертикальные профили температуры и солености вблизи входа в пролив Дарданеллы: соленость — ●, температура — □; в левом нижнем углу указан номер месяца

Закключение. Поступающие через Босфор черноморские воды распространяются в поверхностном слое Мраморного моря, толщина которого меняется в пределах от 20 до 25 м. Несмотря на небольшое время обновления (около полу-года), соленость в предпроливных областях заметно различается. Эти различия минимальны в летний период, когда они составляют 0,6 – 0,9 ‰, при этом соленость вблизи входа в пролив Дарданеллы равна 21 – 22 ‰. В январе – марте различие возрастает и может достигать 5,5 ‰, соленость около пролива Дарданеллы достигает 29 ‰. Сезонная зависимость интенсивности трансформации черноморских вод вызвана действием нескольких механизмов, связанных с изменениями плотностной стратификации и объема поступлений через Босфор, а также с усилением волнового перемешивания в зимний период.

Максимальные и минимальные значения температуры верхнего слоя в предпроливных областях близки между собой и наблюдаются в августе и феврале – марте соответственно. Профилям температуры в обеих областях присущи характерные особенности в виде подповерхностных минимумов и максимумов.

Работа выполнена при поддержке Украинского научно-технологического центра (проект № 1725).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров С.О. Об обмене вод Черного и Средиземного морей // Приложение к т. II «Записок АИ» – 1885. – № 6. – С. 1 – 147.
2. Шиндлер И.Б. Материалы по гидрологии Мраморного моря // Записки Императорского Русского Географического Общества. – 1896. – 33, № 2. – С. 1 – 70.
3. Nielsen J.N. Hydrography of the Mediterranean and adjacent waters // Report of the Danish Oceanographical Expeditions 1908 – 1910 to the Mediterranean and adjacent waters / Ed. J. Schmidt. – Copenhagen. – 1912. – № 1. – P. 72 – 191.
4. Плахин Е.А. Гидрология средиземных морей // Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 264 с.
5. Beşiktepe Ş.T., Sur H.I., Özsoy E. et al. The circulation and hydrography of the Marmara Sea // Prog. Oceanogr. – 1994. – 34. – P. 285 – 334.
6. Özsoy E., Gregg M., Latif M.A. et al. Turkish Straits System // Proceeding of the «Second International Conference on the Eastern Mediterranean and Black sea: Similarities and Differences of the Two Interconnected Basins», – Ankara, Turkey: TÜBITAK, 2002. – P. 89 – 94.
7. Lemeshko E.M., Stanichny S.V., Hopkins T.S. et al. Effects of the Black sea water manifestation in the north Aegean sea // Ibid. – P. 112 – 118.
8. Суворов А.М., Андриященко Е.Г., Годин Е.А и др. Банк океанологических данных МГИ НАНУ: содержание и структура баз данных, система управления базами данных // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. – С. 130 – 137.
9. MEDAR/MEDATLAS 2002 // Final Project Report. – MAS3-CT98-0174 & ERBIC20-CT98-0103. – 2002. – 503 p.
10. Запезалов А. С. Сезонная изменчивость вертикальных распределений температуры и солёности в Мраморном море // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 2. – С. 78 – 84.
11. Гончаров В.П., Емельянова Л.П., Михайлов О.В. и др. Площади и объёмы Средиземного и Черного морей // Океанология. – 1965. – 5, вып. 6. – С. 987 – 992.
12. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. I. Гидрометеорологические условия / Под ред. А.И. Симонова. Э.Н. Альтмана. – С.-Пб: Гидрометеиздат, 1991. – 429 с.
13. Ünlüata Ü., Oğuz T., Latif M.A. et al. On the physical oceanography of the Turkish straits // NATO ASI Series. Volume: The physical oceanography of sea straits / Ed. L. J. Pratt. – Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1990.
14. Beşiktepe Ş.T., Özsoy E., Ünlüata Ü. Filling of the Marmara Sea by the Dardanelles Lower Layer Inflow // Deep-Sea Res. – 1993. – 40. – P. 1815 – 1838.
15. Богданова А.К. Гидрология Босфора и прибосфорского района Черного моря // Водобмен через Босфор и его влияние на гидрологию и биологию Черного моря. – Киев: Наук. думка, 1969. – С. 5 – 121.
16. De Filippi G.L., Lovenitti L., Akyarlı A. Current analysis in the Marmara-Bosphorus junction // Ist. AIOM (Associazione di Ingegneria Offshore y Marina) Congress, Venice, June 1986. – 1986. – P. 5 – 25.
17. Beşiktepe Ş.T. Density currents in the two-layer flow: an example of Dardanelles outflow // Oceanologica Acta. – 2003. – 26. – P. 243 – 253.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 25.04.05
После доработки 24.10.05

ABSTRACT Analysis is based on the comparison of hydrological characteristics of the Sea of Marmara pre-strait regions. It is shown that in summer the Black Sea waters mix poorly with those of the Mediterranean Sea and salinity in the pre-strait regions differs by 0.6 – 0.9 ‰. In winter the difference increases: salinity near the entrance to the Dardanelles achieves 29 ‰ exceeding that near the entrance to the Bosphorus by 5.5 ‰. In the examined regions near the interface between two water masses, the local temperature maximums and minimums are observed that is conditioned by presence of strong seasonal variability of the Black Sea water temperature and absence of such a phenomena in the Mediterranean Sea. Physical mechanisms determining seasonal variability of the intensity of the Black Sea water transformation are discussed.