

*Водные биоресурсы и среда обитания*  
2022, том 5, номер 1, с. 33–44  
<http://journal.azniirkh.ru>, [www.azniirkh.ru](http://www.azniirkh.ru)  
doi: 10.47921/2619-1024\_2022\_5\_1\_33  
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



*Aquatic Bioresources & Environment*  
2022, vol. 5, no. 1, pp. 33–44  
<http://journal.azniirkh.ru>, [www.azniirkh.ru](http://www.azniirkh.ru)  
doi: 10.47921/2619-1024\_2022\_5\_1\_33  
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

УДК 556.16:639.2/.3(282.247.36)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОХАЛИННОГО СПОСОБА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КВАЗИОДНОРОДНОСТИ ВОДНЫХ МАСС АЗОВСКОГО МОРЯ

© 2022 В. М. Шишкин, С. В. Жукова, В. Г. Карманов, Л. А. Лутынская,  
Д. С. Бурлачко, Т. И. Подмарева, Е. А. Тарадина

*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),  
Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия  
E-mail: gidroazniirh@yandex.ru*

**Аннотация.** В работе рассмотрена возможность применения термохалинного способа (с построением T,S-диаграмм) определения квазиоднородности водных слоев в Азовском море на основании экспедиционных данных, полученных в период 2016–2020 гг. Построены диаграммы, позволяющие выявить в водной среде собственно Азовского моря (без учета Таганрогского залива) двухслойную структуру вод. Проведен анализ стратификации вод в условиях, близких к естественному режиму моря (а следовательно, и солености), а также в современных условиях его осолонения. Математическими приемами подтверждены данные анализа выборочных наблюдений и предложены объяснения с позиций T,S-анализа водной среды. Приводятся гидрологические особенности солевого режима Азовского моря с конкретизацией ситуаций в периоды адвекции черноморских вод, вследствие которой возникали условия для устойчивого разделения водной среды на юге моря на поверхностную и придонную «водные массы». Эти возможности обосновываются математически, а для современного периода значительного осолонения моря в соответствии с теорией T,S-анализа водных масс предлагается классификационная оценка водной среды.

**Ключевые слова:** температура, соленость, условная плотность, водная среда, водная масса, структура, устойчивость вод

## USE OF THE THERMOHALINE METHOD FOR DETERMINING THE QUASI-HETEROGENEITY OF THE WATER MASSES IN THE AZOV SEA

V. M. Shishkin, S. V. Zhukova, V. G. Karmanov, L. A. Lutynskaya,  
D. S. Burlachko, T. I. Podmareva, E. A. Taradina

*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI “VNIRO”),  
Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”), Rostov-on-Don 344002, Russia  
E-mail: gidroazniirh@yandex.ru*

**Abstract.** This paper considers the possibility of applying the thermohaline method (using the construction of T,S-diagrams) to determine the quasi-heterogeneity of water layers in the Azov Sea drawing on the expedition data obtained in 2016–2020. The diagrams allowing to identify a two-layer water structure in the aquatic environment of the Azov Sea (excluding the area of Taganrog Bay) have been constructed. The analysis of water stratification in the conditions close to the natural regime of the sea (thus, including salinity), as well as in the present conditions of its salinization, has been carried out. The data obtained through the analysis of sample observations have been verified with mathematical methods; the explanations from the standpoint of T,S-analysis of the aquatic environment have been presented. The hydrological features of the salt regime of the Azov Sea are given with the specification of the situations during the advection of the Black Sea waters, which precondition a stable separation of the waters in the southern part of the sea into surface and bottom “water masses”. These possibilities are justified mathematically, and for the modern period of considerable salinization of the sea, in accordance with the theory of T,S-analysis of water masses, a classification assessment of the aquatic environment is proposed.

**Keywords:** temperature, salinity, conditional density, aquatic environment, water mass, structure, water stability

## ВВЕДЕНИЕ

В современный период, начиная с 2007 г., в связи с наступлением продолжительного маловодного цикла в формировании материкового стока в Азовском море отмечается тенденция неуклонного роста солености, среднегодовые значения которой в 2020 г. достигали рекордно высоких отметок (14,83 ‰). В пространственном распределении в настоящее время большая часть собственно моря характеризуется соленостью, равной 15 ‰. В связи с этим отмечаются процессы существенных структурных преобразований параметров водной среды, оценить степень которых в период беспрецедентного повышения солености являлось целью настоящей работы.

На основе многолетних экспедиционных данных мониторинга параметров водной среды Азовского моря (1960–2020 гг.) произведена оценка потенциально возможных изменений в структуре вод с позиций анализа их «расслоения», наиболее характерного для акватории собственно Азовского моря.

При исследовании устойчивых по степени однородности и весьма значительных по объемам водных масс с целью выявления их генетических характеристик, наряду с температурой (Т) и соленостью (S), возникает необходимость определения условной плотности ( $\sigma_t$ ). Специфика пространственного и временного распределения условной плотности, как правило, служит неплохим ориентиром для обнаружения и описания водных масс. Термин «водные массы» по сути его определения относят к большим объемам морской воды, которые обычно сохраняют свои типичные качественные

характеристики в течение длительного времени. Для Азовского моря, в связи с малыми размерами, «классическая» оценочная позиция, базирующаяся на определении «водных масс» по ГОСТ [1], в целом является некорректной. Однако в условиях прогрессирующего осолонения Азовского моря и развития тенденций, способствующих росту стратификации, применение понятия «водные массы» со временем становится приемлемым.

В классической интерпретации для этой цели использован так называемый «Т,S-анализ» водных масс, описанный О.И. Мамаевым [2]. В этом формате анализа фигурирует изменяющаяся условная плотность ( $\sigma_t$ ), и по степени ее изменчивости, которую ограничивает система координат температуры и солености (Т,S), можно определить генетическую принадлежность водных масс. Так, сравнивая изменения этих показателей воды в рамках табличных значений солености для вод Мирового океана по океанологическим таблицам [3] и, соответственно, для вод Азовского моря в одних и тех же температурных пределах, легко увидеть существенную разницу в значениях условной плотности ( $\sigma_t$ ). Для океанских вод при температуре 21 °С в диапазоне солености 34,5–35,0 ‰ условная плотность варьирует от 24,134 до 24,513 у. е., а для водной среды Азовского моря при этих же грациях температуры воды, но в диапазоне солености от 13,15 до 13,20 ‰ (также по океанологическим таблицам), рассматриваемый параметр изменяется всего лишь от 7,93 до 7,96 у. е. (т. е. в целом уменьшается почти в четыре раза).

Учитывая более низкие значения солености вод Азовского моря по сравнению с океанскими вода-

ми, мелководность моря и значительную стратификацию, в работе рассмотрен характер распределения значений  $\sigma_t$  не только в масштабе площадей водных пространств, но и по глубинам.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выполнения работы были использованы материалы экспедиционных исследований, проведенных в Азовском море, — в основном, за период 1960–2020 гг. (в апреле, июне, июле, августе и октябре). Для анализа использовались как фактические значения солёности и условной плотности в воде, фиксируемой по вертикали, так и расчетные показатели их средневзвешенных величин, определенных по 12 районам моря. Гидрологические съемки Азовского моря, как правило, проводились по 34 станциям на стандартных горизонтах: поверхность, 5 м и придонный [4].

Районирование акватории Азовского моря и методы определения солёности изложены в работе А.П. Куропаткина и др. [5].

Обработка гидрологических данных осуществлялась статистическими методами. В частности, применялся метод выявления корреляционных зависимостей с построением соответствующих моделей по параметрам: температура воды, солёность и условная плотность воды. Использовались графические формы представления промежуточных результатов. Для определения тенденций изменчивости плотностей проведен их анализ в пространстве и времени. Математическими приемами также подтверждаются упомянутые трактовки анализа выборочных наблюдений, и предлагаются объяснения с позиций T,S-анализа водных сред.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В современных условиях среднегодовая (средневзвешенная) солёность Азовского моря в 2017 г., составляя 13,80 ‰, впервые превысила максимальное значение солёности периода 1960–2016 гг. (13,76 ‰ в 1976 г.). В июле и октябре 2018 г. произошел дальнейший рост солёности соответственно до 14,05–14,19 ‰, в октябре 2019 г. солёность Азовского моря достигала значения 14,35 ‰, но особенно высокие показатели солёности отмечались осенью 2020 г. (15,28 ‰). При этом значение солёности, равное 18,30 ‰, отмеченное в придонном горизонте на станции в районе Керченского

предпролива, является абсолютным максимумом за период наблюдений 1960–2020 гг.

Интенсивному росту солёности, наряду с отмеченным маловодным циклом в формировании материкового стока (с 2007 г.), способствовала интенсивная адвекция черноморских вод в собственно Азовское море, которая осуществлялась, как правило, в придонные горизонты южного района. Например, в июне 2018 г. на юге Азовского моря перепады солёности по вертикали в слое 5,0–10,5 м достигали 3,55 ‰, а в верхнем слое (0–5 м) — всего лишь 0,24 ‰. Общая устойчивость вод в обоих случаях оказалась на высоком уровне (31 и 11,5 тыс. у. е., соответственно). Таким образом, соответственно росту солёности повышались и значения устойчивости вод, а также возрастала условная плотность как образующий компонент устойчивости. На данном примере показано, что в условиях значительного повышения солёности создается структура вод, весьма близкая к двухслойному формированию. Следует заметить, что подобные значения устойчивости (а соответственно, и условной плотности) нередко характерны и для поверхностных вод Черного моря в теплый период года [6, 7].

При изучении пространственно-временной изменчивости температуры, солёности и условной плотности воды Азовского моря установлено, что за период 1960–2020 гг. средневзвешенное значение температуры воды изменялось летом от 22,3 °С (в августе 1961 г.) до 27,2 °С (в августе 2016 г.). Особенно высокой оказалась амплитуда колебаний температур воды осенью в Таганрогском заливе: от 3,2 °С (октябрь–ноябрь 1976 г.) до 19,1 °С (октябрь 1999 г.). В пространственном отношении экстремально прогретыми участками акватории собственно моря (до 27,5 °С в 2017 г.) оказались его западные районы.

Как известно, изменчивость температуры воды и солёности в Азовском море вызывает значительные колебания величин условной плотности. Взаимосвязь упомянутых элементов с расчетными значениями условной плотности уже была приведена выше. Максимальные значения условной плотности в 2016–2020 гг. в связи с увеличением солёности моря нередко находились на уровне 10,5–10,7 у. е. При таком высоком уровне плотностного расслоения вод на юге собственно моря в 2018 г. общая устойчивость в глубинном слое 5–10 м возрастала до 55972 у. е. В целом для динамики стратифика-

ции вод характерна следующая закономерность: чем ниже температура воды и выше соленость, тем выше значения формирующейся условной плотности. Так, например, в октябре 2017 г. при сравнительно низких значениях температуры воды (около 15 °С) почти всю акваторию собственно моря занимали воды с условной плотностью, превышающей 10 у. е. (90 % случаев). И напротив, при высоких значениях температур в водной среде (порядка 26 °С), которые имели место в июле 2016 г., в этих же районах моря, но при относительно пониженных значениях солености (13,5–13,9 ‰), условная плотность не превышала 7 у. е., т. е. воздействие температурного фактора оказалось противоположно направленным, но в обоих случаях проявлялось весьма активно.

Режим солености Азовского моря в основном определяется суммарным стоком рек Дона и Кубани (т. е. материковым стоком) и процессами водообмена с Черным морем через Керченский пролив. Анализ изменения и пространственного распределения солености указывает на то, что за последние семь лет (2014–2020 гг.) участились адвекции черноморских вод, наиболее проявляемые в придонных горизонтах на юге моря. Например, в период 2016–2018 гг. формирование придонных вод с соленостью, превышающей 17 ‰, зарегистрировано в трех экспедиционных съемках.

Средняя соленость так называемых «языков» проникновения трансформированных черноморских вод на юг собственно Азовского моря составляла 17,54 ‰, т. е. оказалась по величине очень близкой к среднеголетнему значению солености в водах «Верхней черноморской водной массы» (ВЧВМ), которая по данным В.А. Иванова, В.Н. Белокопытова [6] составляет 17,85 ‰. В результате сравнения этих величин солености появилась рабочая гипотеза о реальной возможности возникновения более длительных проявлений в процессах формирования высокой минерализации вод на юге Азовского моря в районах, сопредельных с черноморскими водами. Эти воды отличаются: с одной стороны, индивидуальными характеристиками двух смешивающихся сред (азовской и черноморской), а с другой, — структурой, типичной для вод с высокой степенью стратификации. Основной причиной формирования такого расслоения вод в Азовском море является водообмен с Черным морем. В соответствии с классификацией [6], более обоснованно считать, что водная среда Азовского

моря по отношению к водным массам Черного моря классифицируется как азовоморская вода (АВ) с соленостью, равной 12–15 ‰, а сопредельная черноморская — относится к типу ВЧВМ. В термин «азовская вода» заложено понятие о том, что образующаяся в Азовском море довольно устойчивая по солености водная среда, как правило, представлена водами с отметкой солености 10–12 ‰ [7]. Средневзвешенные значения солености для Азовского моря в пределах такого относительно стабильного диапазона изменчивости фиксировались в течение длительного времени (1951–2012 гг.), а начиная с 2013 г. отмечается непрерывный рост среднегодового значения солености, составившего в среднем за период 2013–2020 гг. 13,20 ‰.

Следует подчеркнуть, что обычно, оценивая воды Азовского моря в целом, традиционно выделяют воды собственно Азовского моря и Таганрогского залива [7]. В реальных условиях в море фиксируется также «промежуточный» класс воды, образующийся при смешении речных и морских вод [8]. В прибрежных районах моря и в частности в предустьевых пространствах рек такие воды (опресненные зоны) формируют буферную среду, обогащенную питательными для рыб веществами.

В чаще собственно Азовского моря происходят сравнительно замедленные инерционные процессы, в результате которых возникает несколько иная (локальная) структура вод. В естественных условиях режима Азовского моря, по сравнению с условиями современного периода, водная среда в качественном отношении была менее зависимой от количества вод, поступающих со стороны Черного моря. Это было связано с тем, что за счет высоких значений материкового стока в естественных условиях (например, в период 1923–1952 гг. при стоке 38 км<sup>3</sup>) балансовая составляющая, характеризующая поступление вод в Азовское море со стороны Черного, оказалась меньше на 1,1 км<sup>3</sup> [7], чем в условиях зарегулирования рек в период 1960–1976 гг. Кстати, за период 1960–2020 гг. число случаев со значением солености Азовского моря, равным 12 ‰ (и ниже), составляло 75 %. Изменение солености в диапазоне от 12 до 13 ‰ отмечалось в 25 % случаев, а превышение порога солености в 13 ‰ за этот же период достигало 15 % случаев, причем в их число попадают последние 6 лет наблюдений (2015–2020 гг.).

Долгое время существовало традиционное представление о том, что пространственная локализация воды «Азова» (как, впрочем, и воды Северного Каспия) очень изменчива, и на больших площадях акватории, особенно в условиях естественного режима, воды характеризовались относительной однородностью. В естественных условиях климатические факторы не всегда способствовали возникновению устойчивой стратификации вод. Возможно, в связи с этим при описании характеристик трансформированных вод употреблялся термин «азовоморские воды» [6], а не «азовские воды», как было принято по [7].

Исследование процесса формирования плотностной характеристики вод Азовского моря при режиме солености в современный период (при значениях солености, равных 14,30–15,50 ‰) позволило установить, что повторяемость возникновения в водах собственно моря ситуаций с повышенной стратификацией солености и температуры значительно возрастает. Подобные особенности распределения плотности при повышенных значениях солености рассматривались с позиций межгодовой изменчивости по отдельным районам моря летний период в работах А.Т. Кочергина и др. [9] и А.П. Куропаткина [10], и данными исследованиями (особенно за период с 2016 по 2020 г.) подтверждается увеличение вероятности возникновения в водах собственно моря ситуаций с повышенной стратификацией (как солевой, так и температурной). Повышенная стратификация объясняется проникновением в придонные горизонты южной части Азовского моря квазиоднородных вод Черного моря через Керченский пролив (рис. 1).

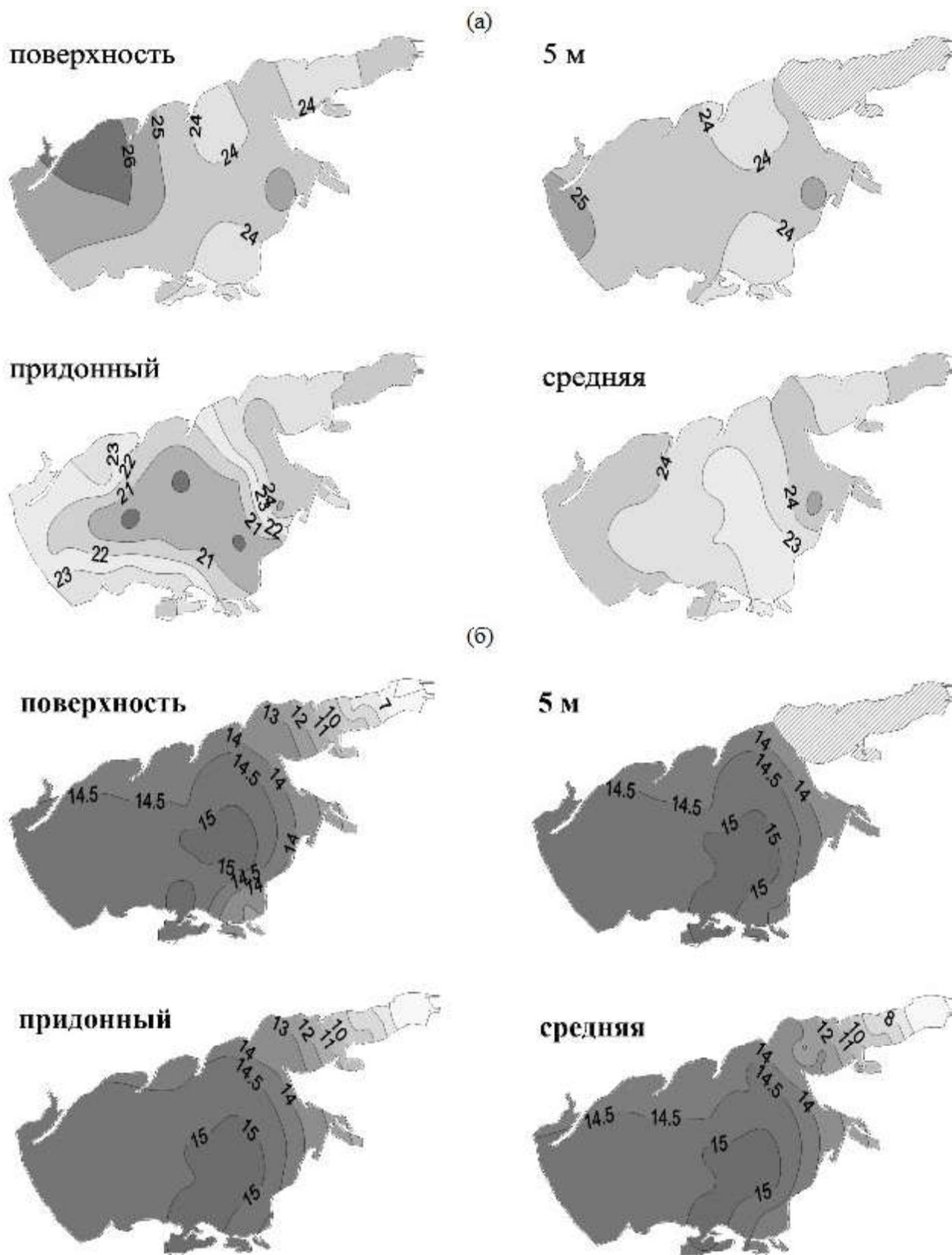
Анализом представленного распределения установлено, что для центральных и юго-восточных районов собственно моря характерна температурная стратификация вод по вертикали от поверхностного до придонного горизонтов (с перепадом температуры, равным 3 °С). Тем не менее там же, в слое 0–5 м (в Темрюкском заливе), обнаружен сравнительно однородный состав вод со значением температуры 24 °С (рис. 1а).

При анализе горизонтального распределения солености (рис. 1б) просматривается однородная структура, сформировавшаяся в пределах адвективного слоя «5 м – дно», выраженная «клином вторжения», оконтуренным изогалиной 15 ‰. Протяженность этого слоя в северо-восточном направлении составляла около 120 км.

Проведенные сравнения позволяют предполагать, что, во-первых, как следствие, на юге Азовского моря возможно появление более четкой фронтальной границы, разделяющей воды Азовского и Черного морей. Во-вторых, именно показатели условной плотности, зависящие от температуры, солености и глубины, могут служить индикатором генезиса термохалинного состояния водной среды Азовского моря.

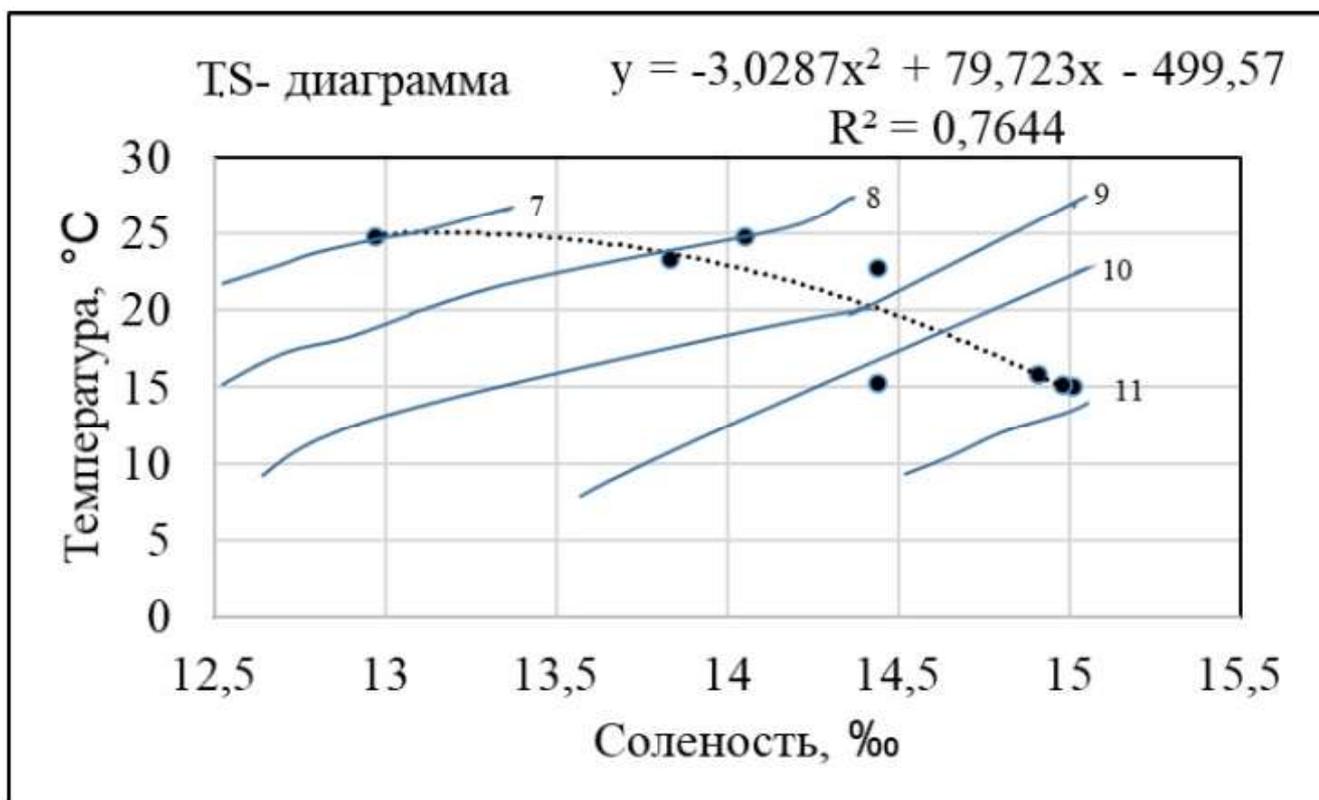
Для подтверждения данной гипотезы рассмотрен пробный вариант, в котором были подвергнуты анализу значения условной плотности, распределенные в среде АВ и полученные двумя способами: по методике Кнудсена и расчетами по формуле О.И. Мамаева [2]. Значения условной плотности ( $\sigma_t$ ) были представлены графически в виде поля изолиний и совмещены с плоскостью T,S-диаграммы (рис. 2).

При построении графика (рис. 2) в изменениях  $\sigma_t$  были приняты ограничения интервалом от 7 до 11 у. е. При этом изолинии параметра  $\sigma_t$ , изменяющегося в диапазоне от 10 до 11 у. е., из-за малочисленности выборки представлены графически в упрощенном виде, т. е. как прямые линии изопикн (изолиния, соединяющая точки равной плотности). В плоскости диаграммы также отражена кривая, характеризующая зависимость температуры (у) от солености (х) с достоверностью ( $R^2=0,76$ ), аппроксимируемая помещенным на рисунке уравнением (рис. 2). Анализируя графический ход кривой (у) в диапазоне изменений солености от 14,5 до 15 ‰, мы полагаем, что в соответствии с утверждениями в публикации О.И. Мамаева [2] формируются условия для образования двух сред, исходя из того, что фрагмент отрезка кривой в указанном диапазоне солености можно условно принять за прямую линию. Тогда на концах прямой линии фиксируется индивидуальный уровень термохалинного состояния каждой среды [2]. В теории T,S-диаграмм подобный отрезок называется «прямой смешения» двух водных масс. Очевиден факт, что при неравенстве распределения коэффициентов турбулентности в водной среде кривая смешения будет отклоняться от вида прямой. Анализ графического материала показывает, что верхний отрезок прямой (пересечение с изолинией 10 у. е.) характеризует T,S-состояние верхнего слоя водной среды, а нижний отрезок (приближающийся к изолинии 11 у. е.) характеризует структуру вод глубинных горизонтов. Так, в современных условиях осоло-



**Рис. 1.** Распределение по горизонтам фактических и средневзвешенных значений температуры воды (а) и солености (б) в Азовском море, июнь 2020 г.

**Fig. 1.** Distribution of actual and weighted average values of water temperature (а) and salinity (б) in the Azov Sea across the water layers, June 2020



**Рис. 2.** T,S-диаграмма вод Азовского моря (по значениям условной плотности  $\sigma_t$ ) и кривая зависимости температуры (y) от солености (x)

**Fig. 2.** T,S-diagram of the Azov Sea waters (based on the values of the conditional density  $\sigma_t$ ) and the curve of the dependence of temperature (y) on salinity (x)

нения придонных вод Азовского моря (до 15 ‰) рассматриваемый параметр  $\sigma_t$  может достигать значений 10–11 у. е. Например, осенью 2016 г. в центральной части собственно Азовского моря при солености, равной 14,55 ‰ (на придонном горизонте), условная плотность составляла 11,2 у. е. По материалам экспедиционных исследований отмечались случаи с более «жесткими» ситуациями в процессах формирования плотностной структуры в водах собственно Азовского моря. Так, в октябре 2017 г. на стандартной станции на юге Азовского моря при значении солености на горизонте у дна, равной 16,59 ‰, условная плотность составляла 11,865 у. е. При этом солевая составляющая устойчивости в воде на придонном горизонте (11 м) была также высокой (более 13 тыс. у. е.). Сравнение значений плотностей в указанных примерах свидетельствует об относительно незначительных расхождениях и сопоставимости данных в целом.

Согласно теории T,S-кривых [2] сформулирована закономерность, что границей между двумя

водными массами является глубинная отметка, которая располагается посередине прямой смешения. В нашем примере оказалось, что средняя глубина при выборе станций для осуществления анализа распределений показателей температуры (T), солености (S) и условной плотности ( $\sigma_t$ ), по данным октябрьских рейсов в собственно море, составила 9,47 м (т. е. примерно 10 м), и тогда в соответствии с вышеуказанным условием толщина верхнего слоя окажется равной половине показателя глубины, т. е. примерно 5 м, что соответствует общепринятой отметке для стандартного горизонта Азовского моря. Учитывая значения T,S на концах прямой и в ее серединной части, можно полагать, что по всей плоскости соприкосновения двух сред в водах собственно моря соленость окажется равной 14,75 ‰, а условная плотность составит около 10 у. е. (рис. 2). Расчеты, проведенные по формуле смешения, показывают, что соленость нижнего слоя (на глубинах 5–10 м) будет составлять 14,88 ‰. В реальной ситуации придонная соленость на юге моря в октябре 2017 г. составляла

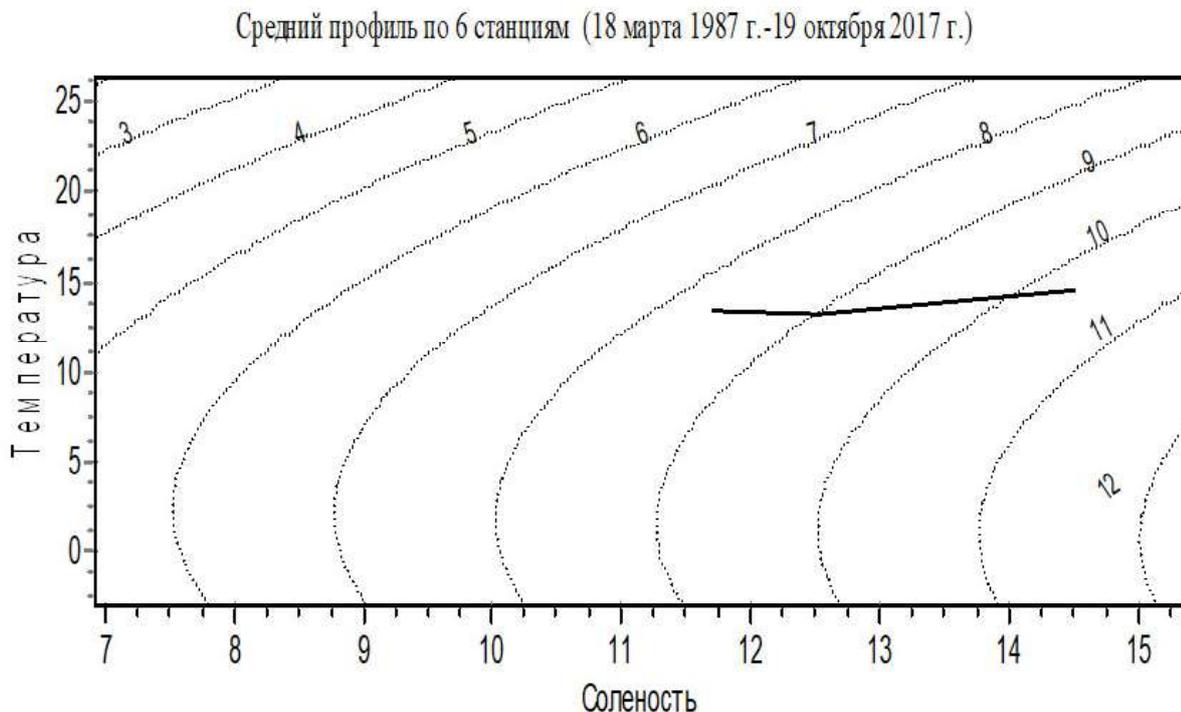
в среднем 14,83 ‰, а в июне 2018 г. — 14,92 ‰. Аналитическая зависимость условной плотности ( $\sigma_t$ ) от солености (S), полученная по экспедиционным данным за летне-осенний период (в диапазоне температур 17–20 °C) в данном случае достоверна (при  $R^2=0,98$ ) и описывается эмпирической связью:

$$\sigma_t = 1,2718 \cdot S - 8,7487. \quad (1)$$

Помимо уже представленного графического построения изолиний (рис. 2), согласно [2] существует возможность воссоздания теоретическим путем поля распределений «изопикн» в формате вычислений при использовании T,S-диаграммы. Для вод Азовского моря этот прием был реализован на примере данных экспедиционных исследований, проведенных в октябре 2017 г. (рис. 3). Анализ представленного рисунка позволяет провести сравнительную оценку эмпирических и теоретических данных.

На представленной диаграмме (рис. 3) между изогалинами 11,75 и 14,5 ‰ демонстрируется разделительная (почти прямая) линия для двух водных слоев Азовского моря: верхнего и нижнего, — характеризуемых по указанным выше термохалин-

ным признакам: в первом случае при T, S, равных, соответственно, 13,8 °C и 11,75 ‰, а во втором — при T, S, равных 15 °C и 14,5 ‰. Значения фактических показателей по T и S, характерных для плоскости соприкосновения двух сред в направлении продольного профиля таковы: соленость в западной части моря составляла 14,76 ‰ при температурном состоянии вод в 15,3 °C, а на востоке — соответственно 11,96 ‰ и 13,2 °C. Усредняя «конечные» термохалинные значения (т. е. значения, снятые с конечных отрезков профиля), а также условно считая распределение прямолинейным, вычисляем средние значения параметров температуры и солености, которые оказались равными 14,20 °C и 13,36 ‰. Затем, анализируя на графике отрезок прямой, определяем значения в срединной его части: температура воды составляет 14 °C, а значение солености — 13,3 ‰. Таким образом, фактические результаты, полученные по данным съемки, и расчетные значения, снятые по T,S-диаграмме, почти эквивалентны. В результате анализа и обработки термохалинных данных, определенных по графику, установлено значение условной



**Рис. 3.** T,S-диаграмма структуры вод Азовского моря (продольный профиль представлен в направлении с востока на запад), октябрь 2017 г.

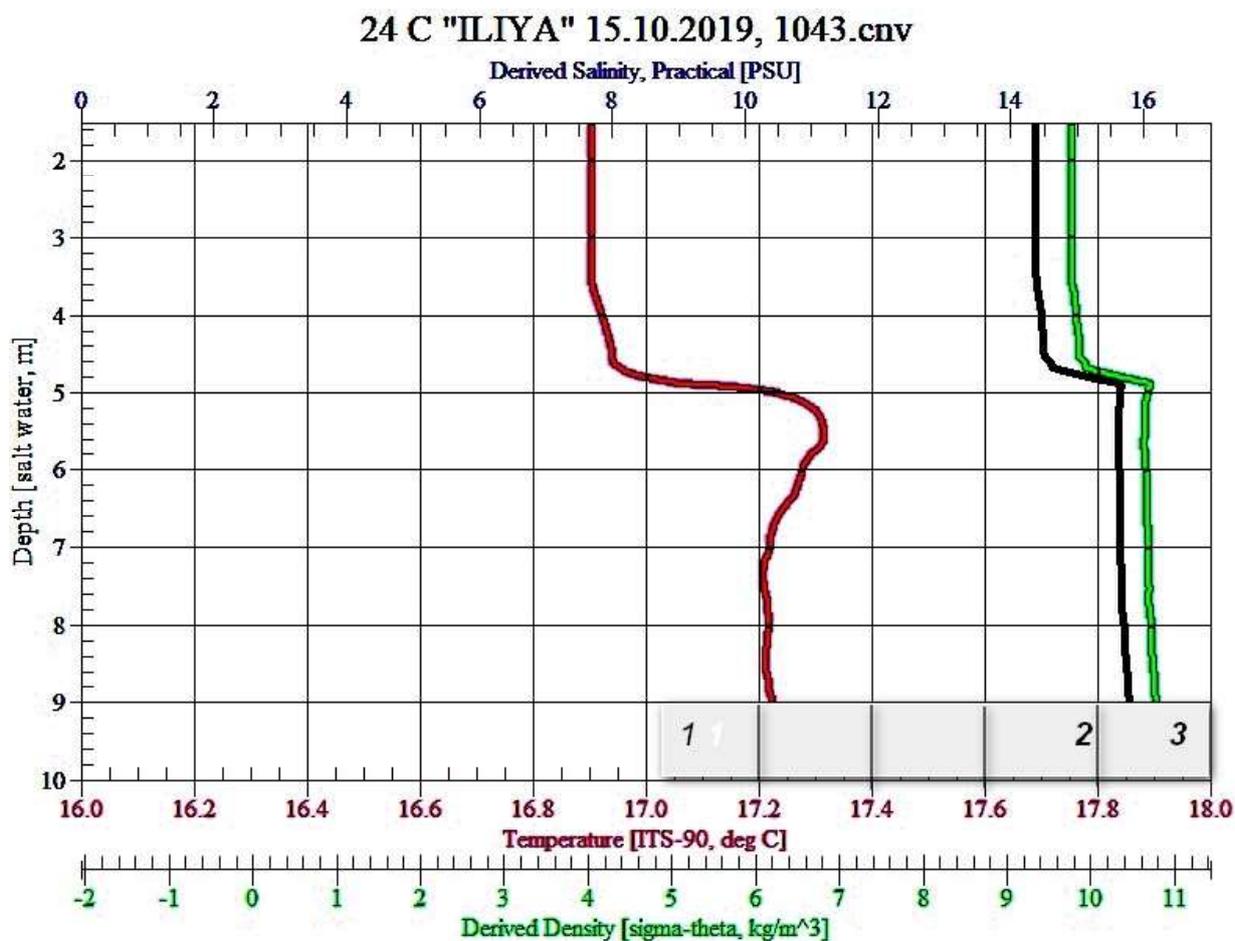
**Fig. 3.** T,S-diagram of the structure of the Azov Sea waters (the longitudinal profile is presented in the direction from east to west), October 2017

плотности, равное 9,7 у. е.; значение, рассчитанное по океанологическим таблицам [3], оказалось практически таким же (9,735 у. е.). Судя по данным октябрьского рейса, выполненного в 2017 г., среднеарифметическое расчетное значение условной плотности составило 9,818 у. е., т. е. данные являются сопоставимыми.

Представленная схема формирования условий образования двух водных сред (исходя из того, что линейный отрезок на T,S-диаграммах близок к прямой линии) может служить не только качественным показателем термохалинного расслоения вод, но и в определенной мере позволяет определять глубинное положение и толщину слоя. Вероятность образования устойчивого «расслоения» водной среды во многом зависит от ряда факторов, главным из которых является процесс осолонения моря. При значительных темпах осолонения вод на юге Азовского моря в октябре 2019 г. (рис. 4)

степень стратификации температуры, солености и плотности в слое водной толщи от поверхности до горизонта 5 м оказалась весьма значительной, а следовательно, и показательной при выделении границы раздела слоев. Эти выводы в определенной мере справедливы, если структурная композиция элементов водной среды не подвергается значительному разрушению путем перемешивания вод из-за ветровых воздействий, развития течений и других причин.

При формировании погодных условий в период экспедиционных исследований, как правило, в результате вышеперечисленных последствий эпизодически происходит существенное нивелирование (а порой и окончательное размывание) границ раздела водных слоев. Так, например, с учетом указанных обстоятельств при работе с зондом в периоды за август и октябрь 2019 г. установлено, что из общего числа зондирований (на 35 стан-



**Рис. 4.** Распределение по глубине температуры (1), солености (2) и условной плотности (3) на юге Азовского моря в октябре 2019 г.

**Fig. 4.** Distribution of temperature (1), salinity (2) and conditional density (3) by depth in the Southern Azov Sea in October 2019

циях) в собственно море по характеру распределения приборных записей в 11 случаях были зафиксированы квазиоднородные характеристики (от поверхностного горизонта до придонного) как по температуре воды, так и по солености и плотности.

Следует отметить, что представленное вертикальное распределение температуры, солености и условной плотности практически идентично, и излом кривых во всех случаях происходит на горизонте 5 м (рис. 4).

Для дополнительной аргументации зависимость плотностного распределения от солености проанализирована в несколько ином ракурсе. Связь между плотностью и соленостью изучена в двух вариантах: в условиях сравнительно незначительного уровня осолонения вод моря с изменчивостью температур от 12 до 15 °С (рис. 5а), а также при значительном росте солености и повышении температуры от 19 до 22 °С (рис. 5б). Анализом графического положения параметра  $\sigma_t$  по кластерам (по 5 измерений в каждом) установлен факт нелинейности распределения величин для первого варианта в

диапазоне изменений условной плотности от 8,40 до 8,75 у. е. Охлаждение водной среды, происходящее при осеннем конвективном процессе, способствует разрушению стратификации вод, что графически отражено соответствующим трендом в нижней части «кластерной» ветви (рис. 5а). В верхней части этой графической зависимости (выше отметки  $\sigma_t$ , равной 8,75) степени воздействия солевого и температурного факторов примерно уравновешены.

Область, представленная кластерами (распределениями значений плотностей) в условиях значительного осолонения (рис. 5б), при оконтуривании всех точек имеет вид параллелограмма, где его средняя линия может быть описана уравнением прямой в виде:

$$\sigma_t = -3,876 \cdot S + 71,252, (R^2 = 0,97). \quad (2)$$

Рассмотренная выше многофункциональная возможность построения прямых, отражающих зависимость плотностей от высоких значений солености, позволяет с большей точностью определять генезис АВ-вод. По оценкам, произведен-

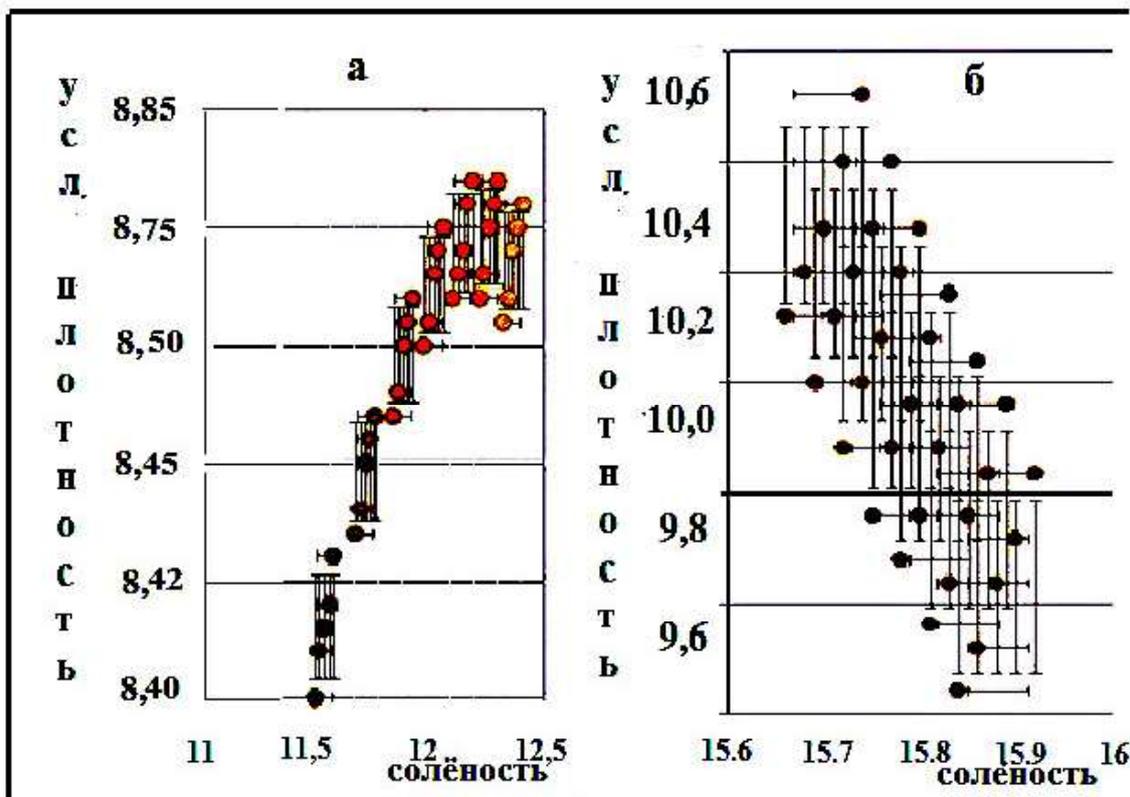


Рис. 5. Распределение условной плотности ( $\sigma_t$ ) и стандартного отклонения в зависимости от изменений солености

Fig. 5. Distribution of conditional density ( $\sigma_t$ ) and standard deviation depending on changes in salinity

ным по материалам экспедиционных исследований, при значительном осолонении Азовского моря потенциально трансформированная масса придонного слоя теоретически может достигать объема 136,5 км<sup>3</sup> (42 % от объема всего Азовского моря).

Если, исходя из исследований В.Г. Дубининой [11], считать, что благоприятные для рыб условия формируются в водной среде Азовского моря при солености, не превышающей 11,5 ‰, то согласно расчетам по T,S-диаграмме (рис. 3) в летний период (при температуре 25 °С) значение условной плотности будет составлять около 6 у. е. По этим же данным [11], среда с соленостью, близкой к 14 ‰, характеризуется крайне низкой продуктивностью. Проведя аналогичный расчет по T,S-диаграмме, можно заключить, что условная плотность при данной солености и при таких же значениях температуры воды будет составлять 7,9 у. е., что согласуется с расчетными данными, полученными по данным съемки моря в августе 2019 г.

Частичным подтверждением этому служит ситуация, отмеченная в период экспедиционных исследований 14–15 октября 2019 г. При солености 15,1–15,8 ‰ и температуре 16,8–17,3 °С в центральном и южном районах Азовского моря условная плотность водной среды нередко реально варьировала в пределах от 10,2 до 10,8 у. е.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем анализа экспедиционных данных и использования T,S-анализа для современных условий формирования солености Азовского моря, превышающей 14,5–15,0 ‰, выявлен диапазон изменения параметров, позволяющий потенциально обнаруживать два водных слоя по аналогии, тождественной механизму идентификации водных масс как в Черном море, так и в водах Мирового океана. Рассмотренные в работе изменения условий формирования стратификации вод Азовского моря позволили сделать следующие выводы:

1. В условиях преобладания тенденции повышения солености в современный период в южных районах моря формируется сравнительно устойчивая двухслойная структура вод с границей разделения на глубине около 5 м. Устойчивость этой структуры подтверждена на примерах расчетов условной плотности по данным экспедиционных исследований, полученным с использованием T,S-диаграмм и применением методов статистической обработки.

2. Гипотетически предположив относительную устойчивость двухслойной структуры, возникшей в условиях осолонения моря в южных районах Азовского моря и имеющей высокое сходство с водами верхнего квазистационарного слоя Черного моря, можно с меньшей осторожностью применять термин «водные массы» к водам собственно Азовского моря, а поэтому с большей степенью достоверности использовать Кнудсенский принцип в расчетах основных режимных характеристик водной среды (солености и плотности).

3. Проведенные исследования позволяют заключить, что термохалинная структура вод Азовского моря по своим показателям обнаруживает все большее сходство с водами Черного моря, в залив которого Азовское море постепенно превращается.

Анализ изменчивости структуры вод Азовского моря в пространственно-временном масштабе указывает на связь этих трансформаций с продуктивностью экосистемы моря. В современных условиях повышения солености моря процесс развития зон с высокими значениями в плотностной структуре вод становится все более интенсивным, тем самым способствуя сохранению вероятности образования зон гипоксии, особенно в условиях длительного формирования маловетренных ситуаций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18451-73 Океанология. Термины и определения. М.: Изд-во Государственного комитета стандартов Совета министров СССР, 1973. 63 с.
2. Мамаев О.И. T,S-анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 364 с.
3. Океанологические таблицы. 4-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 477 с.
4. Методы рыбохозяйственных и природоохранных исследований в Азово-Черноморском бассейне: сб. науч.-метод. работ / Под ред. С.П. Воловика, И.Г. Корпаковой. Краснодар: Изд-во АзНИИРХ, Просвещение-Юг, 2005. 351 с.
5. Куропаткин А.П., Жукова С.В., Шишкин В.М., Бурлачко Д.С., Карманов В.Г., Лутынская Л.А., Фоменко И.Ф., Подмарева Т.И. Изменение солености Азовского моря // Вопросы рыболовства. 2013. Т. 14, № 4 (56). С. 666–673.
6. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: Изд-во Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины, 2011. 209 с.
7. Современный и перспективный водный и солевой баланс южных морей СССР / Под ред. А.И. Симонина, Н.П. Гоптарева. М.: Гидрометеиздат, 1972. 236 с.

8. Бурлачко Д.С., Подмарева Т.И., Безрукавая Е.А., Фролова А.Д. Формирование опресненных зон в условиях осолонения Азовского моря // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития : труды III Всерос. конф. (г. Санкт-Петербург, 16–17 декабря 2019 г.). СПб: Химиздат, 2019. С. 129–133.
9. Кочергин А.Т., Жукова С.В., Малыгин Е.Ю. Межгодовая изменчивость солености и вертикальной термохалинной устойчивости в различных районах Азовского моря в летний период 1992–2016 гг. // Системы контроля окружающей среды. 2018. Вып. 11 (31). С. 63–68. doi: 10.33075/2220-5861-2018-1-63-68.
10. Куропаткин А.П. Исследования изменений пространственно-временной структуры полей солености в Азовском море // Режим и биологические ресурсы Азово-Черноморского бассейна: проблемы устойчивого развития рыбного хозяйства : матер. Междунар. науч. конф. (г. Ростов-на-Дону, 17–19 декабря 2003 г.). Ростов-н/Д.: Изд-во АЗНИИРХ, 2003. С. 92–103.
11. Дубинина В.Г. Методические основы экологического нормирования безвозвратного изъятия речного стока и установления экологического стока (попуска). М.: Экономика и информатика, 2001. 120 с.
6. Ivanov V.A., Belokopytov V.N. Okeanografiya Chernogo morya [Oceanography of the Black Sea]. Sevastopol: Morskoy gidrofizicheskiy institut Natsional'noy akademii nauk Ukrainy [Marine Hydrophysical Institute of the Ukrainian National Academy of Sciences] Publ., 2011, 209 p. (In Russian).
7. Sovremennyy i perspektivnyy vodnyy i solevoy balans yuzhnykh morey SSSR [Present and future water and salt balances of southern seas in the USSR]. A.I. Simonov, N.P. Goptarev (Eds.). Moscow: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1972, 236 p. (In Russian).
8. Burlachko D.S., Podmareva T.I., Bezrukavaya E.A., Frolova A.D. Formirovanie opresnennykh zon v usloviyakh osoloneniya Azovskogo morya [Formation of desalinated zones in the conditions of salinization of the Azov Sea]. In: *Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya : trudy III Vserossiyskoy konferentsii (g. Sankt-Peterburg, 16–17 dekabrya 2019 g.)* [Hydrometeorology and ecology: achievements and prospects for development. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> All-Russian Conference (Saint Petersburg, 16–17 December, 2019)]. Saint Petersburg: Khimizdat [Chemistry Publishing House], 2019, pp. 129–133. (In Russian).
9. Kochergin A.T., Zhukova S.V., Malygin E.Yu. Mezhdogodovaya izmenchivost' solenosti i vertikal'noy termokhalinnoy ustoychivosti v razlichnykh rayonakh Azovskogo morya v letniy period 1992–2016 gg. [Inter-annual variability of salinity and vertical thermohaline stability in the different areas of the Sea of Azov in summer season of 1992–2016]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy* [Environmental Control Systems], 2018, issue 11 (31), pp. 63–68. doi: 10.33075/2220-5861-2018-1-63-68. (In Russian).

## REFERENCES

1. GOST 18451-73 Okeanologiya. Terminy i opredeleniya [State Standard 18451-73 Oceanology. Basic concepts. Terms and definitions]. Moscow: Gosudarstvennyy komitet standartov Soveta ministrov SSSR [State Committee of Standards at the Council of Ministers of the USSR] Publ., 1973, 63 p. (In Russian).
2. Mamaev O.I. T,S-analiz vod Mirovogo okeana [Temperature–salinity analysis of World Ocean waters]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1970, 364 p. (In Russian).
3. Okeanologicheskie tablitsy. 4-e izdanie [Oceanological tables. 4<sup>th</sup> ed.]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1975, 477 p. (In Russian).
4. Metody rybokhozyaystvennykh i prirodookhrannykh issledovaniy v Azovo-Chernomorskom bassejne : sbornik nauchno-metodicheskikh rabot [Methods of fishery and nature protection research in the Azov-Black Sea Basin. Collection of research and methodological works]. S.P. Volovik, I.G. Korpakova (Eds.). Krasnodar: AzNIIRKH Publ., Prosveshchenie-Yug [Awareness-South], 2005, 351 p. (In Russian).
5. Kurapatkin A.P., Zhukova S.V., Shishkin V.M., Burlachko D.S., Karmanov V.G., Lutyanskaya L.A., Fomenko I.F., Podmareva T.I. Izmenenie solenosti Azovskogo morya [Changes in salinity of the Azov Sea]. *Voprosy rybolovstva* [Problems of Fisheries], 2013, vol. 14, no. 4 (56), pp. 666–673. (In Russian).
10. Kurapatkin A.P. Issledovaniya izmeneniy prostranstvenno-vremennoy struktury poley solenosti v Azovskom more [Investigation of the changes in the spatial and temporal structure of salinity fields in the Azov Sea]. In: *Rezhim i biologicheskie resursy Azovo-Chernomorskogo bassejna: problemy ustoychivogo razvitiya rybnogo khozyaystva : materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (g. Rostov-na-Donu, 17–19 dekabrya 2003 g.)* [Regime and biological resources of the Azov and Black Sea Basin: problems of sustainable development of fisheries. Proceedings of the International Scientific Conference (Rostov-on-Don, 17–19 December, 2003)]. Rostov-on-Don: AzNIIRKH Publ., 2003, pp. 92–103. (In Russian).
11. Dubinina V.G. Metodicheskie osnovy ekologicheskogo normirovaniya bezvozvratnogo iz'yatiya rechnogo stoka i ustanovleniya ekologicheskogo stoka (popuska) [Methodology for setting environmental standards for nonrecoverable flow discharge and setting environmental flow]. Moscow: Ekonomika i informatika [Economics and IT], 2001, 120 p. (In Russian).

Поступила 30.09.2021

Принята к печати 27.01.2022