

Холодный промежуточный слой Черного моря по данным экспедиционных исследований 2016–2019 годов

А. Н. Морозов*, Е. В. Маньковская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: anmorozov@mhi-ras.ru*

Поступила: 08.04.2020 г.; принята к публикации 08.05.2020 г.; опубликована 25.06.2020 г.

Цель настоящей статьи – представить и обсудить осредненные характеристики холодного промежуточного слоя, полученные на основе предварительного анализа материалов двенадцати экспедиций Морского гидрофизического института РАН, выполненных в северном – северо-восточном районах Черного моря в 2016–2019 гг. В работе использованы данные *CTD*-измерений и измерений профилей скорости течений, полученные в экспедициях 2016–2019 гг. Рассмотрены и проанализированы вертикальные профили температуры, потенциальной плотности, частоты плавучести, скорости и направления течений. Рассмотрена связь среднемесячной температуры воздуха с осредненными значениями минимальных температур воды. Получена зависимость средней солёности в ядре холодного промежуточного слоя от минимальной температуры воды. Получены и проанализированы изопикнические осредненные профили температуры воды и частоты плавучести. По данным 2017 г. проведена оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии для горизонта минимальных температур. Значение температуры воды в ядре холодного промежуточного слоя менее 8 °С наблюдается только в экспедициях 2017 г. После холодной зимы 2016–2017 гг. время релаксации экспоненциального восстановления температуры ядра слоя составляет один год. Минимальные значения температуры вод холодного промежуточного слоя наблюдаются при значении потенциальной плотности 14.5–14.6 кг/м³ в окрестности локального минимума частоты плавучести между сезонным термоклином и основным халоклином. Возмущения вертикальной термической структуры, вызванные холодной зимой 2016–2017 гг., прослеживаются до глубины залегания изопикны со значением потенциальной плотности 15.7 кг/м³. На интервале наблюдений нижняя граница слоя при значении температуры 8.6 °С поднимается со средней скоростью 10 м в год. Косвенная оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в ядре холодного промежуточного слоя составила около 6·10⁻⁶ м²/с.

Ключевые слова: холодный промежуточный слой, Черное море, вертикальное турбулентное перемешивание.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0827-2019-0002 «Оперативная океанология», № 0827-2019-0004 «Прибрежные исследования».

© Морозов А. Н., Маньковская Е. В., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Холодный промежуточный слой Черного моря по данным экспедиционных исследований 2016–2019 годов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 5–16. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-5-16

Cold Intermediate Layer of the Black Sea according to the Data of Field Research in 2016–2019

A. N. Morozov*, E. V. Mankovskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: anmorozov@mhi-ras.ru*

Submitted 08.04.2020; revised 08.05.2020; published 25.06.2020

This paper aims at presenting and discussing the cold intermediate layer averaged characteristics obtained from a preliminary analysis of the data of twelve expeditions carried out by the Marine Hydrophysical Institute in 2016–2019 in the northern and north-eastern regions of the Black Sea. The study uses data of CTD-measurements and current velocity profiles measurements obtained in 2016–2019 expeditions. Vertical profiles of temperature, potential density, buoyancy frequency, and velocity and direction of currents are considered and analyzed. The relationship between the average monthly air temperature and average values of minimum water temperatures is considered. The dependence of the average salinity in the cold intermediate layer core on the minimum water temperature is obtained. Isopycnically averaged dependences of water temperature and buoyancy frequency were obtained and analyzed. For 2017, the vertical turbulent diffusion coefficient in the cold intermediate layer core was estimated. The water temperature less than 8 °C in the cold intermediate layer core was observed only in the 2017 expeditions. After a cold winter of 2016–2017, the relaxation time of exponential recovery of the layer core temperature was one year. The minimal water temperature of the cold intermediate layer is observed at a potential density of 14.5–14.6 kg/m³ in the vicinity of buoyancy frequency local minimum between the seasonal thermocline and the main halocline. Disturbances of the vertical thermal structure caused by a cold winter of 2016–2017 can be traced to the depth of the isopycnic with a potential density of 15.7 kg/m³. During the observation time, the lower boundary of the layer at a temperature of 8.6 °C was rising at an average speed of 10 m per year. Indirect estimates of the vertical turbulent diffusion coefficient in the cold intermediate layer core were about 6·10⁻⁶ m²/s.

Keywords: cold intermediate layer, Black Sea, vertical turbulent mixing.

Acknowledgements: the research is performed under state order on topics No. 0827-2019-0002 “Operational oceanology” and No. 0827-2019-0004 “Coastal studies”.

For citation: Morozov, A.N. and Mankovskaya, E.V., 2020. Cold Intermediate Layer of the Black Sea according to the Data of the Expedition Field Research in 2016–2019. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 5–16. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-5-16 (in Russian).

Введение

Холодный промежуточный слой (ХПС) является наиболее известной особенностью вертикальной термохалинной структуры вод Черного моря. Механизмам его формирования и эволюции посвящено большое число научных исследований, соответствующую библиографию можно найти

в работах [1–4]. В настоящее время установлено, что существуют два основных взаимодополняющих механизма формирования ХПС: конвективный и адвективный [5, 6]. Конвективный механизм предполагает выхолаживание вод в центрах западного и восточного круговоротов моря в зимний сезон и последующее растекание вод по изопикнам к периферии [7] со средней скоростью ~ 3 см/с [8]. Адвективный механизм предполагает зимнее выхолаживание вод на северо-западном шельфе, их погружение и стекание по наклонному дну к свалу глубин, где они подхватываются Основным Черноморским течением и распространяются по всему бассейну [9]. Анализ климатических изменений температуры ядра ХПС показывает ее возрастание после 1992 г. [10–13]. Современные исследования, основанные как на данных натуральных измерений [4, 8, 14], так и на результатах численных экспериментов [3, 15], также показывают значительное потепление ядра ХПС, что приводит к необходимости выбора новых критериев границ слоя. Классическое определение границ слоя по изотерме 8°C [16] в последнее десятилетие встречается редко, и исследователи вынуждены предлагать новые значения отсчетной температуры, например 8.35°C в работе [12] и 8.7°C в [4].

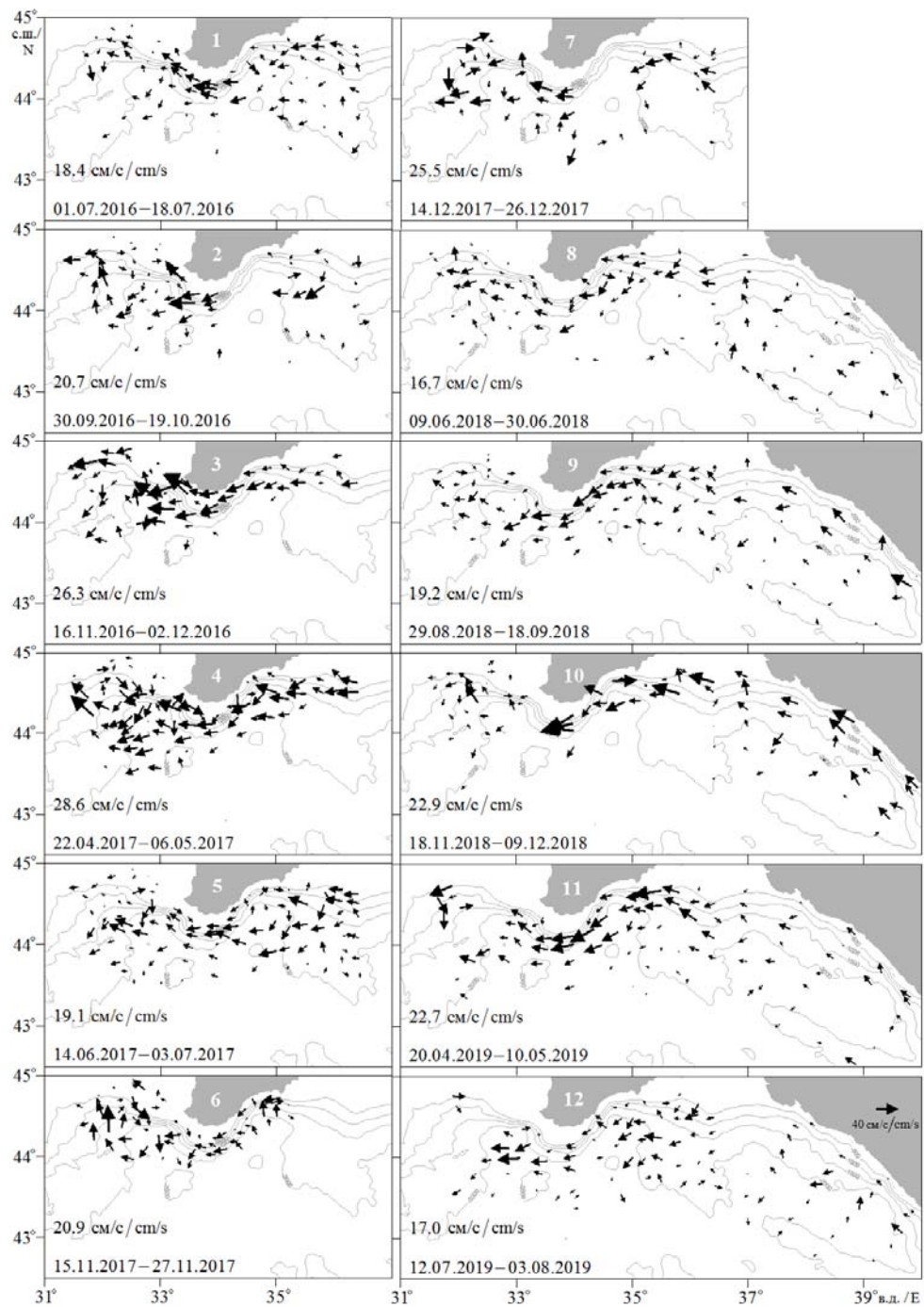
Цель настоящей статьи – представить и обсудить осредненные характеристики ХПС, полученные на основе предварительного анализа материалов двенадцати экспедиций Морского гидрофизического института РАН, выполненных в северном – северо-восточном районах Черного моря в 2016–2019 гг.

Приборы и данные

В экспедициях для *CTD*-измерений использовался зонд *SBE911+*, измерение профилей скорости течений производилось погружаемым акустическим доплеровским профилометром течений (*LADCP*) на основе *WHM300* производства *RDI* США. На рис. 1 для каждой из станций всех экспедиций в векторном виде приведены скорости течения на глубине залегания изопикны со значением потенциальной плотности 14.5 кг/м^3 (положение станции – начало стрелки). Экспедиции на графиках обозначены номерами в хронологическом порядке, в левом нижнем углу приведены среднеквадратические значения скорости течения и даты проведения измерений. По данным *LADCP*-измерений в каждой экспедиции, крупномасштабная циклоническая циркуляция наиболее хорошо выражена в районе моря, прилегающем к Крымскому п-ову, и проявляется в доминировании течения западного направления. В других районах моря в данных практически мгновенных измерений скорости течения крупномасштабная циркуляция может быть замаскирована как мезомасштабными процессами, так и инерционными колебаниями, скорость которых сопоставима со скоростью Основного Черноморского течения. Наибольшие среднеквадратические значения скорости течения наблюдаются с октября по декабрь и в апреле – мае, что соответствует имеющимся представлениям о сезонной изменчивости крупномасштабной циркуляции вод Черного моря [17].

Результаты и обсуждение

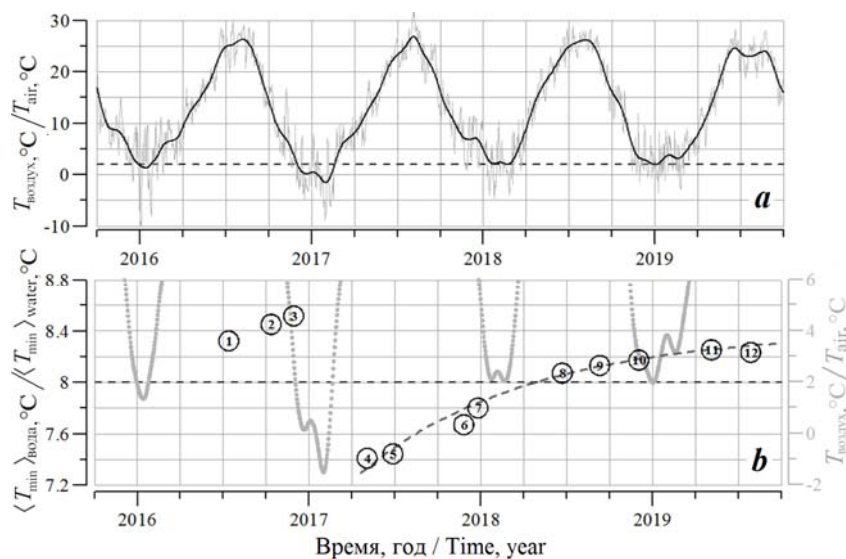
Наиболее простой параметр, характеризующий ХПС в отдельно взятом профиле, – это минимум температуры воды (T_{\min}). Осредненное по ансамблю станций отдельной экспедиции значение минимальной температуры воды



Р и с . 1. Положение станций и скорость течения на глубине залегания изопикны $\sigma_\theta = 14.5 \text{ кг/м}^3$ для каждой экспедиции. Слева внизу среднее квадратическое значение скорости течения и время проведения измерений

Fig. 1. Position of the stations and current velocity at the depth with a conditional density of 14.5 kg/m^3 for each expedition. Bottom left of each map: mean square value of the current velocity and time of measurement

$\langle T_{\min} \rangle$) определяет среднее для полигона значение температуры в ядре ХПС за время проведения измерений. На рис. 2, *a* приведена температура воздуха, зарегистрированная на метеостанции г. Керчи (данные сайта <http://www.pogodaiklimat.ru>), серая линия – среднесуточные значения температуры, черная – среднемесячные ее значения. На рис. 2, *b* кружочками представлена средняя температура ядра ХПС (левая шкала), числа – номера экспедиций. Серые линии – среднемесячные значения температуры воздуха (правая шкала). Из рис. 2, *b* видно, что зима 2017 г. была наиболее холодной и среднемесячная температура воздуха опускалась на 3–4 °С ниже, чем в другие рассматриваемые годы. В результате холодной зимы произошло обновление вод ХПС, которое вызвало понижение температуры в его ядре на ~ 1 °С (разность температур между 3-й и 4-й экспедициями). После 2017 г. наблюдаются умеренные зимы, в ядре ХПС повышение температуры происходит почти по экспоненциальному закону со временем релаксации один год: аппроксимирующая функция $\langle T_{\min} \rangle(t) = 7 + 1.4 (1 - \exp(-(t - 2017)))$, t – время в годах (черная штриховая линия на рис. 2, *b*). Приведенный материал показывает, что классическая граница ХПС (изотерма 8 °С), наблюдается только в экспедициях 2017 г. Следует отметить, что понижение температуры ядра ХПС в 2017 г. сопровождалось понижением солёности его вод. На рис. 3 приведена зависимость средней солёности в ядре ХПС от его температуры. Пунктирная линия соответствует потенциальной плотности $\sigma_\theta = 14.5 \text{ кг/м}^3$.



Р и с . 2. Среднесуточная (серая линия) и среднемесячная (черная линия) температура воздуха в г. Керчи (*a*), осредненные значения минимальной температуры воды в профилях на станциях (числа в кружочках – номера экспедиций) для каждой экспедиции и среднемесячная температура воздуха в Керчи (серая линия, правая шкала) (*b*)

Fig . 2. Daily (gray line) and monthly (black line) averaged air temperature in Kerch (*a*), average values of minimum water temperatures in station profiles (numerals in circles are expedition numbers) for each expedition and monthly average air temperature in Kerch (gray line, right scale) (*b*)

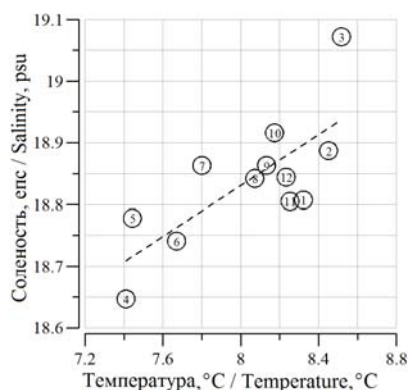


Рис. 3. Зависимость солености в слое с минимальным значением температуры воды от минимальной температуры воды, осредненной для каждой экспедиции

Fig. 3. The relation between salinity in the layer with minimal water temperature and the minimum water temperature averaged for each expedition

Такое поведение полученной зависимости может отображать изопикничность процессов формирования ХПС.

Высокая плотностная стратификация вод в деятельном слое Черного моря делает изопикническое осреднение более информативным, по сравнению с осреднением по горизонтам. С целью получить представление о характерных чертах вертикальной термической структуры вод Черного моря на современном этапе, было выполнено изопикническое осреднение по ансамблям профилей для каждой экспедиции. На рис. 4 приведены осредненные зависимости температуры (*a*) и частоты плавучести (*b*) от условной плотности. Экспедиции выделены цветовой гаммой. В соответствии с рис. 4 минимум температуры наблюдается при значении потенциальной плотности 14.5–14.6 kg/m^3 и находится ниже локального минимума частоты плавучести, который наблюдается при значении потенциальной плотности 14.4–14.5 kg/m^3 . Максимум частоты плавучести в основном пикноклине определяется при значении условной плотности 14.9–15.1 kg/m^3 и составляет около 10 цикл/ч. Возмущение термической структуры, вызванное холодной зимой 2017 г.,

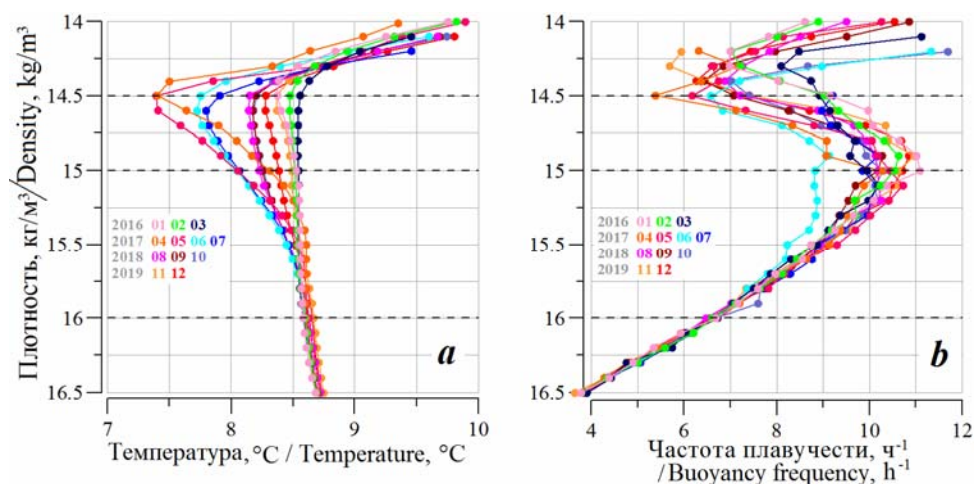


Рис. 4. Изопикнически осредненные зависимости температуры воды (*a*) и частоты плавучести (*b*) от плотности для каждой экспедиции

Fig. 4. Isopycnically averaged dependences of water temperature (*a*) and buoyancy frequency (*b*) on density for each expedition

прослеживается до глубины залегания изопикны со значением потенциальной плотности 15.7 кг/м^3 . При значении потенциальной плотности 16 кг/м^3 межгодовая изменчивость не наблюдается ни в профилях температуры, ни в профилях частоты плавучести. Это обстоятельство позволяет предположить, что профиль температуры в нижней части деятельного слоя моря является установившимся. Отметим, что глубина залегания изопикны $\sigma_\theta = 16 \text{ кг/м}^3$ в среднем составляет 120 м и отклоняется на ± 40 м от станции к станции вследствие куполообразной формы изопикнических поверхностей.

Определенный интерес представляют изопикнически осредненные профили температуры. На рис. 5 представлены результаты осреднения, разбитые по годам: *a* – 2016 г., *b* – 2017 г., *c* – 2018 г., *d* – 2019 г. На каждом графике

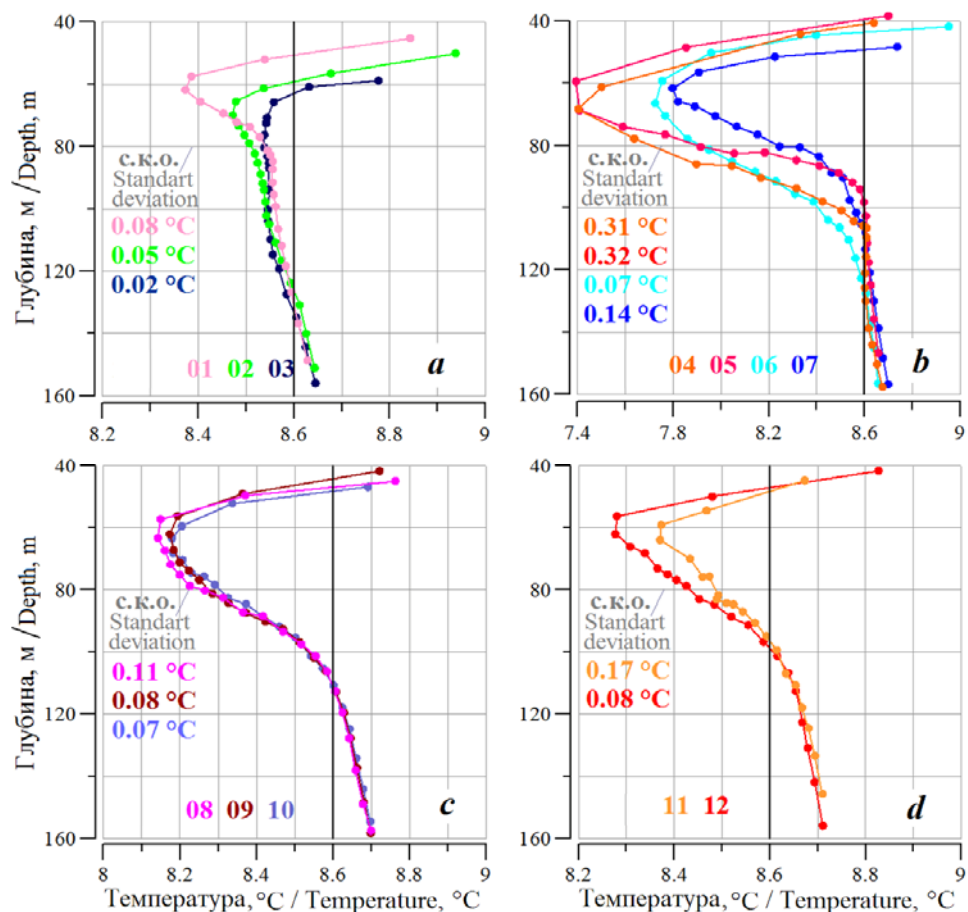


Рис. 5. Изопикнически осредненные профили температуры воды для экспедиций 2016 (*a*), 2017 (*b*), 2018 (*c*) и 2019 гг. (*d*). Цвет графика соответствует номеру экспедиции, приведенному в нижней части рисунка. Слева – среднеквадратическое отклонение (с.к.о.) минимальных температур от их среднего значения для каждой экспедиции

Fig. 5. Isopycnally averaged water temperature profiles for the 2016 (*a*), 2017 (*b*), 2018 (*c*) and 2019 (*d*) expeditions. Coloured numerals at the bottom of the chart are expedition numbers. The standard deviation of minimum temperatures for each expedition is on the left

приведены среднеквадратические отклонения минимальных температур от их среднего по экспедиции значения. Если принять в качестве границы ХПС значение температуры 8.6 °С, то можно отметить, что ежегодно нижняя граница слоя поднимается на ~ 10 м.

По данным экспедиций 2017 г. можно получить оценку коэффициента вертикальной турбулентной диффузии (K_V) для горизонта минимальных температур из соотношения $T_t = K_V \cdot T_{zz}$, где T_t – производная температуры по времени; T_{zz} – вторая производная температуры по глубине [18]. Оценка коэффициента в 2017 г. составляет $K_V = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, что хорошо соответствует оценкам, полученным в Черном море по данным микроструктурных измерений [19, 20]. Отметим, что данные экспедиций 4 и 5, выполненных в 2017 г., показывают наибольшие значения среднеквадратических отклонений минимальных температур (рис. 5, *b*). Это отображает пространственную неоднородность процессов обновления вод ХПС в холодную зиму [6].

Для экспедиций 2018 г. наблюдаются почти одинаковые профили температуры. Согласовать такую стабильность профилей во времени с вертикальным перемешиванием можно только в предположении пространственной неоднородности температуры вод ХПС и их адвекции в район выполнения измерений. Еще больше значение адвекции и неоднородности температуры вод ХПС проявляется в исследованиях экспедиций 2019 г. Значение минимальной температуры по данным 11-й экспедиции (апрель – май) выше, чем по данным 12-й экспедиции (июль – август). Это также можно объяснить исключительно неоднородностью температуры вод ХПС и их адвекцией в район проведения измерений.

Заключение

Предварительный анализ экспедиционных данных *CTD*- и *LADCP*-измерений 2016–2019 гг. в северной и северо-восточной частях Черного моря позволил получить осредненные характеристики ХПС, отражающие его современное состояние.

Приведенный материал показывает, что классическая граница ХПС, составляющая 8 °С, отмечается только в экспедициях 2017 г., в котором произошло обновление вод ХПС. После 2017 г. повышение температуры в ядре ХПС происходит почти по экспоненциальному закону.

Минимум средней (по изопикнам) температуры наблюдается при значении потенциальной плотности 14.5–14.6 кг/м³ и в окрестности локального минимума частоты плавучести, который прослеживается в диапазоне значений потенциальной плотности 14.4–14.5 кг/м³.

Возмущение термической структуры, вызванное холодной зимой 2017 г., прослеживается до глубины залегания изопикны со значением потенциальной плотности 15.7 кг/м³. При значении потенциальной плотности 16 кг/м³ межгодовая изменчивость не наблюдается ни в профилях температуры, ни в профилях частоты плавучести. Оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в ядре ХПС составила $K_V = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Если принять в качестве границы ХПС значение температуры 8.6 °С, то можно отметить, что ежегодно нижняя граница слоя поднимается на ~ 10 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Demyshev S. G., Korotaev G. K., Knysh V. V.* Evolution of the cold intermediate layer in the Black Sea according to the results of assimilation of climatic data in the model // *Physical Oceanography*. 2002. Vol. 12, iss. 4. P. 173–190. <https://doi.org/10.1023/A:1020156026089>
2. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
3. Formation and changes of the Black Sea cold intermediate layer / S. Miladinova [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2018. Vol. 167. P. 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.07.002>
4. *Stanev E. V., Peneva E., Chtirkova B.* Climate change and regional ocean water mass disappearance: case of the Black Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. Vol. 124, iss. 7. P. 4803–4819. <https://doi.org/10.1029/2019JC015076>
5. *Овчинников И. М., Попов Ю. И.* Формирование холодного промежуточного слоя в Черном море // *Океанология*. 1987. Т. 27, № 5. С. 739–746.
6. *Коротаев Г. К., Кныш В. В., Кубряков А. И.* Исследование процессов формирования холодного промежуточного слоя по результатам реанализа гидрофизических полей Черного моря за 1971–1993 гг. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 1. С. 41–56. [doi:10.7868/S0002351513060102](https://doi.org/10.7868/S0002351513060102)
7. *Тумов В. Б.* Зоны формирования и объемы вод холодного промежуточного слоя в Черном море с учетом суровости зим // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 6. С. 62–68.
8. *Куклев С. Б., Зацепин А. Г., Подымов О. И.* Формирование холодного промежуточного слоя в шельфово-склоновой зоне северо-восточной части Черного моря // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 3. С. 58–71. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(3\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).5)
9. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the RIM Current structure, CIW formation and transport in the western Black Sea // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1999. Vol. 46, iss. 10. P. 1733–1753. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00028-X)
10. *Belokopytov V. N.* Interannual variations of the renewal of waters of the cold intermediate layer in the Black Sea for the last decades // *Physical Oceanography*. 2011. Vol. 20, iss. 5. P. 347–355. <https://doi.org/10.1007/s11110-011-9090-x>
11. Реакция термохалинных характеристик деятельного слоя Черного моря на зимнее выхолаживание / В. Б. Пиотух [и др.] // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 2. С. 232–241.
12. Untangling spatial and temporal trends in the variability of the Black Sea Cold Intermediate Layer and mixed Layer Depth using the DIVA detrending procedure / A. Capet [et al.] // *Ocean Dynamics*. 2014. Vol. 64, iss. 3. P. 315–324. <https://doi.org/10.1007/s10236-013-0683-4>
13. *Новикова А. М., Полонский А. Б.* Междесятилетняя изменчивость температуры поверхности и холодного промежуточного слоя в Черном море // *Системы контроля окружающей среды*. 2018. Вып. 34. С. 110–115. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2018-4-110-115>
14. *Akpınar A., Fach B. A., Oguz T.* Observing the subsurface thermal signature of the Black Sea cold intermediate layer with Argo profiling floats // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2017. Vol. 124. P. 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.04.002>

15. Gunduz M., Özsoy E., Hordoir R. A model of Black Sea circulation with strait exchange (2008–2018) // *Geoscientific Model Development*. 2020. Vol. 13, iss. 1. P. 121–138. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-121-2020>
16. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.]. Л. : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
17. Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием / А. Г. Зацепин [и др.] // *Современные проблемы динамики океана и атмосферы: сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П. С. Линейкина* / под ред. А. В. Фролова, Ю. Д. Реснянского. М. : ТРИАДА, 2010. С. 347–368. URL: <http://method.meteorf.ru/publ/books/lineikin/zatsepin.pdf> (дата обращения: 18.05.2020).
18. Cyr F., Bourgault D., Galbraith P. S. Interior versus boundary mixing of a cold intermediate layer // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, iss. C12. C12029. <https://doi.org/10.1029/2011JC007359>
19. Gregg M. C., Yakushev E. Surface ventilation of the Black Sea's cold intermediate layer in the middle of the western gyre // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32, iss. 3. L03604. <https://doi.org/10.1029/2004GL021580>
20. Влияние динамики течений на гидрофизическую структуру вод и вертикальный обмен в деятельном слое Черного моря / А. Г. Зацепин [и др.] // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 327–339.

Об авторах:

Маньковская Екатерина Викторовна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **ResearcherID: AAB-5303-2019**, emankovskaya@mhi-ras.ru

Морозов Алексей Николаевич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9022-3379**, anmorozov@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Морозов Алексей Николаевич – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

Маньковская Екатерина Викторовна – обработка данных измерений, сбор информации для исследования, обсуждение результатов, коррекция текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Demyshev, S.G., Korotaev, G.K. and Knysh, V.V., 2002. Evolution of the Cold Intermediate Layer in the Black Sea according to the Results of Assimilation of Climatic Data in the Model. *Physical Oceanography*, 12(4), pp. 173–190. <https://doi.org/10.1023/A:1020156026089>
2. Ivanov, V.A. and Belokopytov, V.N., 2013. *Oceanography of the Black Sea*. Sevastopol: MHI, 210 p.
3. Miladinova, S., Stips, A., Garcia-Gorritz, E. and Macias Moy, D., 2018. Formation and Changes of the Black Sea Cold Intermediate Layer. *Progress in Oceanography*, 167, pp. 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.07.002>

4. Stanev, E.V., Peneva, E. and Chtirkova, B., 2019. Climate Change and Regional Ocean Water Mass Disappearance: Case of the Black Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(7), pp. 4803–4819. <https://doi.org/10.1029/2019JC015076>
5. Ovchinnikov, I.M. and Popov, Yu.I., 1987. Cold Intermediate Layer Formation in the Black Sea. *Okeanologiya*, 27(5), pp. 739–746 (in Russian).
6. Korotaev, G.K., Knysh, V.V. and Kubryakov, A.I., 2014. Study of Formation Process of Cold Intermediate Layer Based on Reanalysis of Black Sea Hydrophysical Fields for 1971–1993. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 50(1), pp. 35–48. <https://doi.org/10.1134/S0001433813060108>
7. Titov, V.B., 2006. Zones of the Cold Intermediate Layer Formation and the Volume of Waters in the Black Sea Depending on the Severity of Winters. *Meteorologiya i Gidrologiya*, (6), pp. 62–68 (in Russian).
8. Kuklev, S.B., Zatsepin, A.G. and Podymov, O.I., 2019. Formation of the Cold Intermediate Layer in the Shelf-Slope Northeastern Part Zone of the Black Sea. *Journal of Oceanological Research*, 47(3), pp. 58–71. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).5 (in Russian).
9. Oguz, T. and Besiktepe, S., 1999. Observations on the RIM Current Structure, CIW Formation and Transport in the Western Black Sea. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 46(10), pp. 1733–1753. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00028-X)
10. Belokopytov, V.N., 2011. Interannual Variations of the Renewal of Waters of the Cold Intermediate Layer in the Black Sea for the Last Decades. *Physical Oceanography*, 20(5), pp. 347–355. <https://doi.org/10.1007/s11110-011-9090-x>
11. Piotukh, V.B., Zatsepin, A.G., Kazmin, A.S. and Yakubenko, V.G., 2011. Impact of the Winter Cooling on the Variability of the Thermohaline Characteristics of the Active Layer in the Black Sea. *Oceanology*, 51(2), Article 221. <https://doi.org/10.1134/S0001437011020123>
12. Capet, A., Troupin, C., Carstensen, J., Grégoire, M. and Beckers, J.-M., 2014. Untangling Spatial and Temporal Trends in the variability of the Black Sea Cold Intermediate Layer and mixed Layer Depth using the DIVA Detrending Procedure. *Ocean Dynamics*, 64(3), pp. 315–324. <https://doi.org/10.1007/s10236-013-0683-4>
13. Novikova, A.M. and Polonsky, A.B., 2018. Inter-Decadal Variability of the Black Sea Surface and Cold Intermediate Layer Temperature. *Monitoring Systems of Environment*, (34), pp. 110–115. doi:10.33075/2220-5861-2018-4-110-115 (in Russian).
14. Akpınar, A., Fach, B.A. and Oguz, T., 2017. Observing the Subsurface Thermal Signature of the Black Sea Cold Intermediate Layer with Argo Profiling Floats. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 124, pp. 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.04.002>
15. Gunduz, M., Özsoy, E. and Hordoir, R., 2020. A Model of Black Sea Circulation with Strait Exchange (2008–2018). *Geoscientific Model Development*, 13(1), pp. 121–138. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-121-2020>
16. Blatov, A.S., Bulgakov, N.P., Ivanov, V.A., Kosarev, A.N. and Tuzhilkin, V.S., 1984. *Variability of Hydrophysical Fields of the Black Sea*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 240 p. (in Russian).
17. Zatsepin, A.G., Kremenetskiy, V.V., Stanichny, S.V. and Burdyugov, V.M., 2010. Black Sea Basin-Scale Circulation and Mesoscale Dynamics under Wind Forcing. In: A. V. Frolov and Yu. D. Resnyansky, eds., 2010. *Modern Problems of Ocean and Atmosphere Dynamics. The Pavel S. Lineykin Memorial Volume*. Moscow: TRIADA LTD., pp. 347–368 (in Russian).

18. Cyr, F., Bourgault, D. and Galbraith, P.S., 2011. Interior versus Boundary Mixing of a Cold Intermediate Layer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C12), C12029. <https://doi.org/10.1029/2011JC007359>
19. Gregg, M.C. and Yakushev, E., 2005. Surface Ventilation of the Black Sea's Cold Intermediate Layer in the Middle of the Western Gyre. *Geophysical Research Letters*, 32(3), L03604. <https://doi.org/10.1029/2004GL021580>
20. Zatsepin, A.G., Golenko, N.N., Korzh, A.O., Kremenetskii, V.V., Paka, V.T., Poyarkov, S.G. and Stunzhas, P.A., 2007. Influence of the Dynamics of Currents on the Hydrophysical Structure of the Waters and the Vertical Exchange in the Active Layer of the Black Sea. *Oceanology*, 47(3), pp. 301–312. <https://doi.org/10.1134/S0001437007030022>

About the authors:

Alexey N. Morozov, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph. D. (Tech.), **ORCID ID: 0000-0001-9022-3379**, anmorozov@mhi-ras.ru

Ekaterina V. Mankovskaya, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph. D. (Tech.), **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **ResearcherID: AAB-5303-2019**, emankovskaya@mhi-ras.ru

Contribution of the authors:

Alexey N. Morozov – problem setting; processing, analysis and description of the study results; preparation of the article text and graphics

Ekaterina V. Mankovskaya – measurement data processing; collection of information to study; discussion of results; article text correction

The authors have read and approved the final manuscript.