

В. Н. Белокопытов

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

СЕЗОННЫЙ ХОД ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ВОД НА ЧЕРНОМОРСКОМ ШЕЛЬФЕ КРЫМА

На основе массива реанализа термохалинных полей Черного моря за 70-летний период рассчитаны климатические характеристики вертикальной стратификации вод на шельфе Крыма. Описан сезонный ход плотностного соотношения, составляющих вертикальной устойчивости вод, определены периоды преобладания термического или солёностного факторов при формировании поля плотности. Выделено три района: Западный Крым, Южный берег Крыма и Керченский полуостров с региональными отличиями стратификации, что обусловлено их географическим положением относительно основных источников пресных вод и особенностями сезонной изменчивости общей циркуляции моря. Полученные результаты могут быть использованы для оценки параметров вертикального турбулентного обмена, динамики внутренних волн и вихревых движений в шельфовых районах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *термохалинная стратификация, вертикальная устойчивость, плотностное отношение, шельф, Черное море*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-3-19-24

Введение. Стратификация вод – один из важнейших океанографических факторов, влияющий на различные физические процессы в морской среде: развитие конвективного перемешивания, интенсивность вертикального турбулентного обмена теплом и примесями, пространственно-временные масштабы внутренних волн, вихревых движений и многое другое.

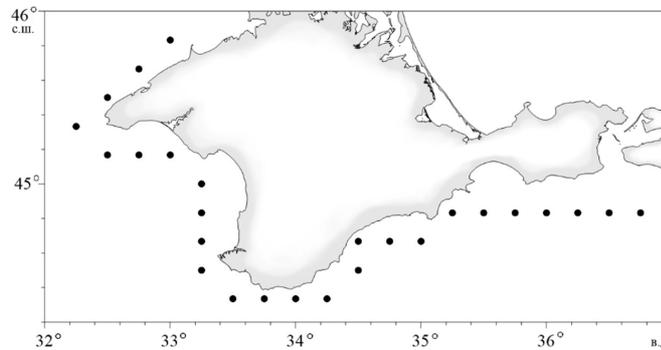
Отдельные характеристики стратификации вод черноморского шельфа, прилегающего к Крымскому полуострову, можно найти в литературе по региональной океанографии Черного моря [1 – 7]. Увеличение накопленного в базах данных экспедиционного материала позволяет более подробно рассмотреть отдельные составляющие вертикальной стратификации и региональные особенности формирования плотностной структуры вод шельфа.

Материалы и методы исследования. Основой работы послужил массив реанализа термохалинных полей Черного моря с пространственным разрешением $10' \times 15'$ и вертикальной дискретностью 5 м за период наблюдений с 1923 по 2018 гг. [8]. Были выбраны 25 узлов вдоль черноморского побережья Крыма на глубинах, не превышающих 50 м (рис.1). Количество среднедекадных (10-дневных) профилей, сведенных в узлы сетки из первичных данных методом оптимальной интерполяции за период 1950 – 2018 гг. составило 10621, количество осредненных по ним среднемесячных профилей – 7285.

Выбор периода 1950 – 2018 гг. для климатического осреднения был обусловлен необходимостью сгладить хорошо выраженные междесятилетние колебания содержания тепла и соли в верхнем 50-метровом слое моря, а также сопутствующих им изменений амплитудно-фазовых характеристик

© В.Н.Белокопытов, 2019

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.3. С.19-24.



Р и с . 1 . Расположение узлов сетки реанализа термохалинной структуры Черного моря [8], используемых для оценок стратификации вод шельфа.

сезонного хода температуры и солености [9].

По вертикальным профилям температуры и солености были рассчитаны значения вертикального градиента плотности воды $d\rho/dz$, частоты плавучести N , термической устойчивости E_t , соленостной устойчивости E_s и плотностного соотношения R :

$$E_t = \alpha \frac{d\theta}{dz},$$

где α – коэффициент термического расширения, θ – потенциальная температура;

$$E_s = \beta \frac{dS}{dz},$$

где β – коэффициент соленостного сжатия, S – соленость;

$$R = \frac{E_t}{E_s}.$$

Вертикальные градиенты рассчитывались с помощью центральных разностей $\frac{dy}{dz} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{z_{i+1} - z_{i-1}}$, за исключением горизонта 0 м, где использовались

конечные разности $\frac{dy}{dz} = \frac{y_{i+1} - y_i}{z_{i+1} - z_i}$ для поверхностного слоя 0 – 5 м.

Для каждого узла были рассчитаны среднемесячные климатические профили. В этих узлах, в целях выявления региональных отличий, вычислялись отклонения от средних по всей области значений, которые далее нормировались на 1 с.к.о. сезонного хода.

Обсуждение результатов. Как и другие участки шельфа Черного моря, расположенные вдали от устьев крупных рек, Крымский шельф характеризуется пониженными значениями вертикальной стратификации вод. Кроме слабого притока пресных вод, снижению стратификации здесь также способствует преобладающая в зоне между берегом и основным черноморским потоком антициклоническая завихренность течений. Нисходящие движения

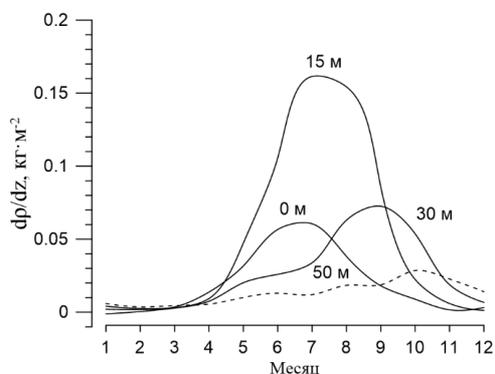


Рис. 2. Сезонный ход средних значений вертикального градиента плотности воды на черноморском шельфе Крыма.

ного пикноклина на горизонтах 15 – 20 м. Глубина залегания сезонного слоя скачка плотности возрастает от 10 м в мае до 30 м в октябре.

Благодаря большой амплитуде внутригодовых колебаний температуры, в формировании стратификации вод в значительной мере доминирует термический фактор. Летом на поверхности моря он превышает вклад солености в 5 раз, в термоклине на горизонте 15 м – более чем в 10 раз. При слабой

увеличивают толщину слоя термоклина, уменьшая значения вертикальных градиентов плотности по сравнению с областью восходящих движений в центральной части моря (примерно на 40 %).

Следуя сезонному ходу температуры воды, с глубиной происходит фазовый сдвиг всех показателей стратификации (рис.2, 3). Наступление максимума $d\rho/dz$ последовательно сдвигается по времени – от июля на поверхности моря до октября на глубине 50 м. Абсолютный максимум ($> 0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$) наблюдается в июле – августе в слое сезон-

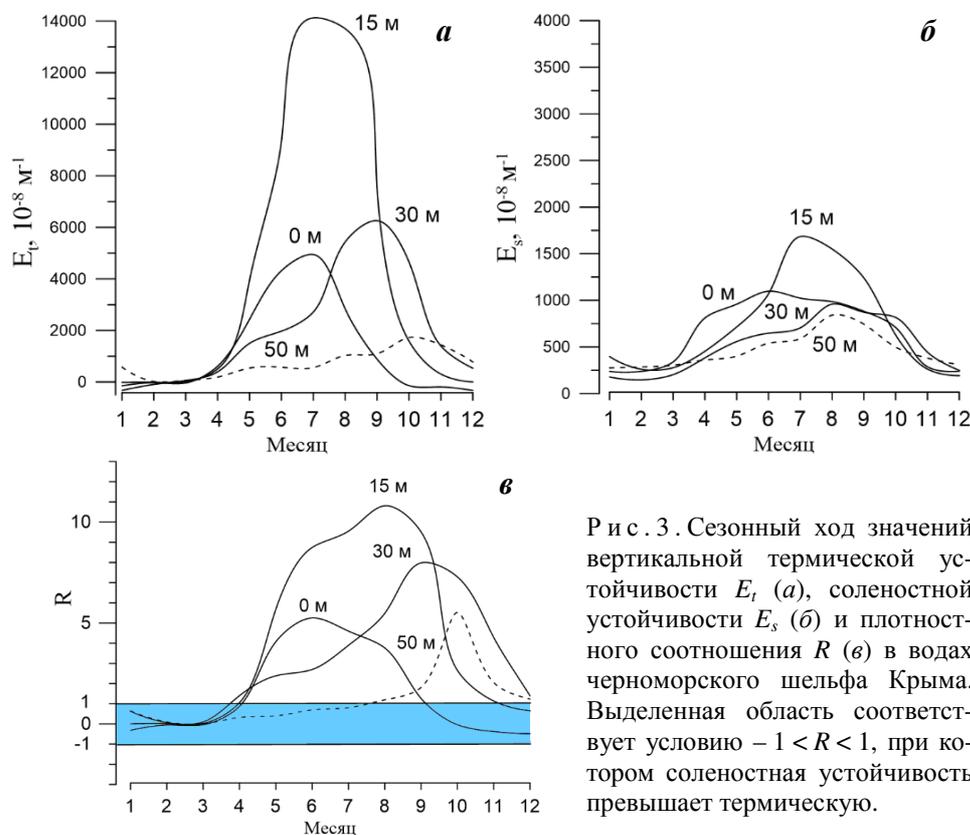


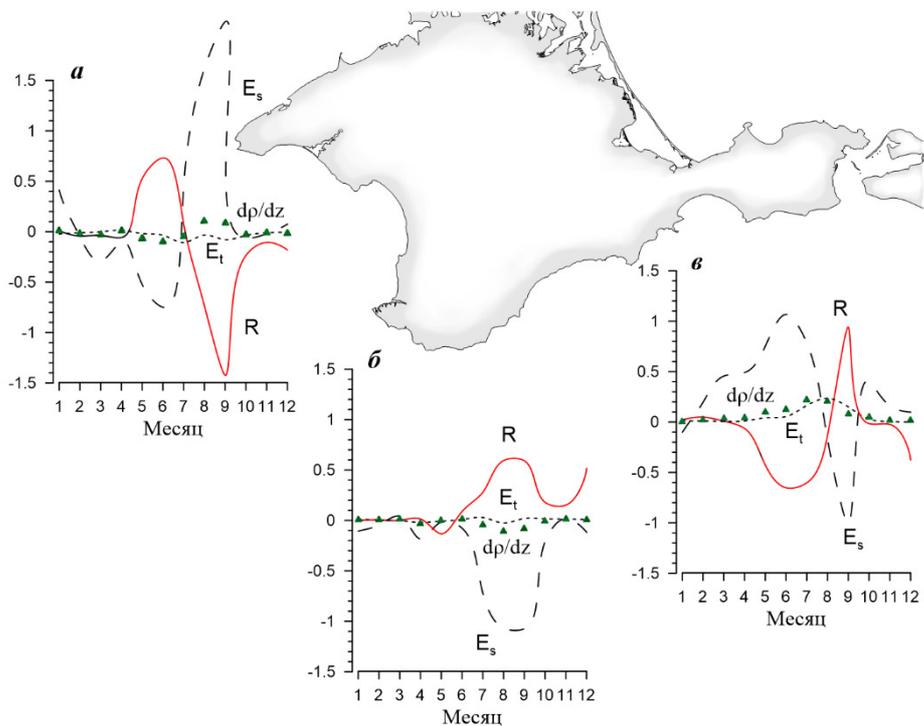
Рис. 3. Сезонный ход значений вертикальной термической устойчивости E_t (а), соленостной устойчивости E_s (б) и плотностного соотношения R (в) в водах черноморского шельфа Крыма. Выделенная область соответствует условию $-1 < R < 1$, при котором соленостная устойчивость превышает термическую.

стратификации в осенне-зимний период, в условиях гомотермии поверхностного слоя, на вертикальное распределение плотности влияет в основном халинная структура вод.

Соотношение роли термического и соленостного факторов в формировании плотностной стратификации, которое явным образом можно определить по параметру R , имеет четкий сезонный ход, изменяющийся с глубиной (рис.4). Продолжительность периода преобладания термической устойчивости растет от 6 месяцев на поверхности моря до 8 месяцев на горизонте 30 м, а далее, в холодном промежуточном слое, она резко уменьшается до 4 месяцев.

Из-за гораздо меньшей сезонной амплитуды солености в сравнении с температурой воды внутригодовые изменения E_s значительно (почти в 10 раз) уступают аналогичным изменениям E_t . Различия в сезонном ходе теплового и водного баланса моря приводят к тому, что в верхнем 30-метровом слое сезонный цикл E_s опережает по фазе сезонный цикл E_t на 1 месяц.

Несмотря на определяющую роль температуры для вертикальной устойчивости вод, региональные особенности стратификации на шельфе Крыма в основном обусловлены пространственными различиями их халинной структуры. Связано это с тем, что $\beta > \alpha$, и в результате для океанографических условий Черного моря пространственные контрасты солености вносят в 1,5 – 2 раза больший вклад в изменения плотности, чем контрасты температуры воды.



Р и с . 4 . Региональные отличия сезонных характеристик вертикальной стратификации вод на горизонте 15 м в районах Западного Крыма (а), Южного берега Крыма (б) и Керченского полуострова (в). Кривые на графиках представляют собой нормированные на 1 с.к.о. отклонения от общих для всего шельфа средних значений, представленных на рис.2, 3.

В течение всего года вертикальные градиенты плотности максимальны на востоке региона, вблизи Керченского полуострова, и на крайнем северо-западе, в Каркинитском заливе. Так, например, вблизи Керченского пролива и у полуострова Тарханкут в июле, при максимально развитой стратификации, в слое сезонного пикноклина значения $d\rho/dz = 0,17 - 0,20$ кг·м⁻², $N = 23 - 25$ цикл/ч, в то время как у Южного берега Крыма (ЮБК) $d\rho/dz = 0,12 - 0,13$ кг·м⁻², $N = 19 - 20$ цикл/ч.

Кроме пространственных контрастов величин $d\rho/dz$ существуют также и менее явно выраженные различия, проявляющиеся в качественно разной форме сезонного цикла для отдельных составляющих вертикальной стратификации. По этому критерию Крымский шельф можно разделить на три района: Западный Крым, ЮБК и Керченский полуостров. Район ЮБК выделяется более слабой стратификацией и наименьшим вкладом соленостной составляющей в летний период. Особенности районов Западного Крыма и Керченского полуострова состоят в том, что региональное преобладание роли соленостной устойчивости в первом из них максимально в конце лета, а во втором – в первой половине года.

Отмеченные особенности этих районов связаны с их географическим положением относительно основных источников пресных вод и региональными проявлениями сезонной изменчивости общей циркуляции моря. В Керченский район поступают воды пониженной солености из Азовского моря и от Кавказского побережья, что обуславливает здесь повышенную вертикальную стратификацию и рост соленостной устойчивости в период весеннего паводка рек. Несмотря на то, что район Западного Крыма находится в непосредственной близости от распресненных вод северо-западного шельфа, их проникновение к побережью становится заметным лишь при летнем ослаблении общей циркуляции и водообмена с открытым морем. Район узкого шельфа ЮБК наиболее удален от источников пресных вод, влияние соленостного фактора на стратификацию вод здесь минимально.

Заключение. При рассмотрении сезонного цикла характеристик вертикальной стратификации вод на основе океанографических данных за длительный период наблюдений выявлено, что:

- черноморский шельф Крыма относится к районам Черного моря с пониженными значениями вертикальной стратификации вод;
- в формировании вертикальной стратификации вод в значительной степени доминирует термический фактор, соленостный фактор преобладает в осенне-зимний период при слабой стратификации;
- в сезонном ходе соотношения роли термического и соленостного факторов в изменения плотности воды наблюдается рост с глубиной продолжительности периода преобладания термической устойчивости вплоть до горизонта 30 м;
- в отличие от определяющей роли температуры для вертикальной устойчивости вод, региональные особенности стратификации вод в основном зависят от их халинной структуры;
- особенности стратификации выделенных районов: Западного Крыма, ЮБК и Керченского полуострова обусловлены их географическим положением относительно основных источников пресных вод и региональными проявлениями сезонной изменчивости общей циркуляции моря.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме 0827-2019-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР*. Т.4. Черное море / Под ред. Терзиева Ф.С.– Л.: Гидрометеоиздат, 1986.– 100 с.
2. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т.4. Черное море / Под ред. Симонова А.И., Альтмана Э.Н.– СПб., 1991.– 429 с.
3. *Гидрометеорологические условия морей Украины*. Т.2. Черное море / Под ред. Ильина Ю.П.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– 421 с.
4. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Гидрометеорологический режим южного побережья Черного моря / Препринт.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1999.– 45 с.
5. *Горячкин Ю.Н., Кондратьев С.И., Ляшенко С.В.* Особенности пространственного распределения гидрологических и гидрохимических характеристик в Феодосийском заливе в августе 2002 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– вып.10.– С.58-69.
6. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Изменчивость солености поверхностных вод в прибрежной зоне Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– вып.12.– С.22-28.
7. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– 212 с.
8. *Belokopytov V.N.* Retrospective analysis of the Black Sea thermohaline fields on the basis of empirical orthogonal functions // *Physical Oceanography*.– 2018.– v.25, iss.5.– P.380-389.
9. *Белокопытов В.Н.* О климатической изменчивости термохалинной структуры Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013.– вып.27.– С.226-230.

Материал поступил в редакцию 28.07.2019 г.
После доработки 06.08.2019 г.

V.N.Belokopytov

SEASONAL VARIABILITY OF VERTICAL THERMOHALINE STRATIFICATION ON THE BLACK SEA SHELF OF CRIMEA

Climatic characteristics of vertical stratification on the Crimean shelf are calculated from the Black Sea thermohaline reanalysis for 70 year. Seasonal variations of density ratio and components of vertical stability are described, periods of predominance of thermal and haline factors for density field formation are determined. Three areas with regional peculiarities of stratification: the Western Crimea, the Southern Coast of Crimea and the Kerch peninsula are selected. These sub-regions differ by geographical location relative to main sources of freshwater and seasonal variability of general circulation. Obtained characteristics can be used for estimations of vertical turbulent mixing, internal wave and eddy dynamics in shelf regions.

KEYWORDS: stratification, vertical stability, density ratio, shelf, the Black Sea