## **———** ОКЕАНОЛОГИЯ **——**

УДК 551.465.62 (262.5)

# ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОКЛИНА В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ОСНОВНОГО ЧЕРНОМОРСКОГО ТЕЧЕНИЯ

© 2021 г. А. А. Сизов<sup>1</sup>, Т. М. Баянкина<sup>1,\*</sup>, Н. Е. Лебедев<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 13.08.2020 г. Поступило 14.08.2020 г. После доработки 19.10.2020 г. Принято к публикации 11.11.2020 г.

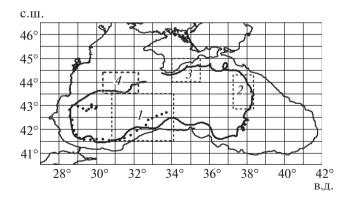
Использование данных дрифтерного эксперимента в зоне действия Основного черноморского течения (ОЧТ) позволило получить предварительные оценки реакции термоклина на изменяющуюся скорость течения. Найдено, что рост скорости ОЧТ приводит к заглублению термоклина с одновременным уменьшением его толщины и ростом градиента температуры в нем. Уменьшение скорости ОЧТ вызывает подъем термоклина на меньшие глубины, сопровождающийся увеличением его толщины и градиента температуры в нем. Приводятся предварительные соображения о возможном механизме такого процесса.

*Ключевые слова:* термоклин, геострофическая скорость, Основное черноморское течение, субрегион **DOI:** 10.31857/S2686739721020183

В зимний сезон Основное черноморское течение (OЧТ) интенсифицируется [1-3], а конвекция и турбулентное перемешивание завершают формирование максимального по глубине верхнего квазиизотермического слоя. Проходящие в нем процессы определяют изменение глубины залегания термоклина [2, 5, 6]. Основными факторами, изменяющими характеристики термоклина в зоне действия ОЧТ в зимний сезон, являются ОЧТ и циклонические круговороты в западной и восточной частях моря, а также вихри обоих знаков на границах ОЧТ [2-4]. Невыясненной остается изменчивость характеристик термоклина в фазы интенсификации и ослабления ОЧТ, что очень важно для оценок турбулентного перемешивания в нем и формирования холодозапаса в холодном промежуточном слое. Поэтому предлагаемая работа посвящена исследованию реакции термоклина на изменяющуюся скорость ОЧТ.

Материалом для исследования послужили данные, полученные с термокос дрейфующих буев (дрифтеров) [7] в течение эксперимента 2012—2014 гг. Термодатчики находились на глубинах 0.2; 10.0; 12.5; 15.0 м и далее через 5 м до 80 м. [7]. Были отобраны четыре участка (субрегиона), где дрифтеры находились со второй половины декаб-

Указанные временные интервалы обусловлены тем, что геострофическая  $V_g$  и поверхностная  $V_s$  скорости, использовавшиеся для оценки реакции термоклина, регулярно рассчитываются по

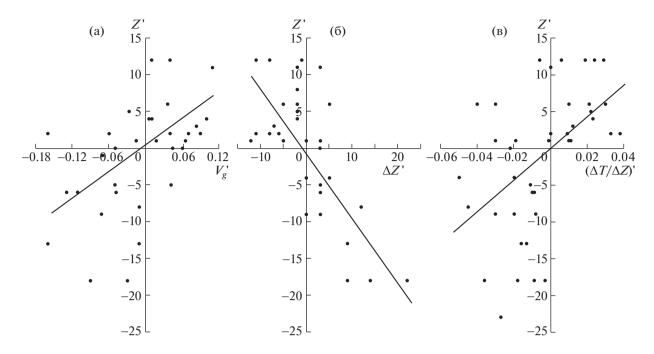


**Рис. 1.** Траектории дрифтеров: с 14.12.2012 по 31.03.2013 — сплошная линия, с 01.01.2014 по 10.02.2014 — точечная. Цифрами обозначены номера субрегионов.

ря по март (гидрологическая зима) в основной струе ОЧТ и не были захвачены синоптическими или мезомасштабными вихрями (рис. 1). Субрегионы располагались: 1- в южной ветви ОЧТ (время нахождения дрифтера 17-22.01.2013, 26.01-10.02.2014), 2- в восточной ветви (4-12.03.2013), 3- у южного берега Крыма (ЮБК) (26-31.03.2013), 4- в северной ветви ОЧТ (18-31.12.2012).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр "Морской гидрофизический институт Российской академии наук", Севастополь, Россия

<sup>\*</sup>E-mail: bayankina t@mail.ru



**Рис. 2.** Связь аномалии глубины термоклина Z', м/с:  $V'_g$ , м/с (a);  $\Delta Z'$ , м (б);  $(\Delta T/\Delta Z)'$ ,  ${}^{\circ}$ С/м (в).

спутниковым данным [8, 9] со второй половины 2011 г. Данные по  $V_g$  и  $V_s$  брались из Банка океанографических данных МГИ, частично представленных на портале сайта МГИ (mhi-ras.ru).

Изменяющаяся скорость ОЧТ регулирует глубину верхней границы термоклина (далее — глубину термоклина), а также его толщину и градиент температуры. Оценка их зависимости от скорости ОЧТ проводилась по рядам аномалий этих характеристик, которые вычислялись в каждом субрегионе как отклонения среднесуточных значений каждой характеристики от их средних величин за все время нахождения дрифтера в субрегионе.

Регрессионный график зависимости аномалий глубины термоклина Z', м от аномалий геострофической скорости  $V_g'$ , м/с показан на рис. 2а. На этом рисунке представлены значения, полученные по субрегионам 1-3. В субрегионе 4 величины  $V_g$  были заметно меньше, чем  $V_s$ , и здесь эти оценки рассчитаны по  $V_s$ .

Как видно, измерения в субрегионах 1-3 показывают устойчивую тенденцию к заглублению границы термоклина при увеличении  $V_g$  и ее подъему на меньшие глубины с ослаблением  $V_g$ . Заметный разброс значений позволяет, тем не менее, аппроксимировать полученную зависимость линейным трендом с  $R^2 = 0.27$ : Z', м =  $60.4V'_g$  + +0.42 м/с. С учетом отношения коэффициента корреляции к ошибке его вычисления  $R/\sigma = 4.3$ ,

эта аппроксимация значима на уровне 95%-ной доверительной вероятности.

Данные по субрегиону 4 близки к данным по субрегионам 1-3. Учитывая это, можно сделать вывод, что вариация скорости ОЧТ формирует соответствующее изменение глубины термоклина в зоне ОЧТ. Толщина термоклина вычислялась как разность глубин изотерм, ограничивающих верхнюю и нижнюю границы термоклина  $(\Delta Z, M)$ . Отношение разности температур на его верхней и нижней границах ( $\Delta T$ , °C) к  $\Delta Z$  представляло градиент температуры в термоклине. На рис. 2б показано изменение аномалий толщины термоклина  $\Delta Z$ ', м в зависимости от аномалий глубины его верхней границы Z. В этом случае представлены данные по субрегионам 1, 2, 4, поскольку в субрегионе 3 измерения проводились в конце гидрологической зимы, когда термоклин максимально заглублен и термокоса дрифтера не достигала его нижней границы. Видно, что заглубление термоклина при увеличении скорости ОЧТ сопровождается уменьшением его толщины. Наблюдается своего рода "сжатие" термоклина. С другой стороны, подъем термоклина на меньшие глубины сопровождается увеличением его толшины. Аппроксимация этого процесса линейным трендом значима на уровне 99%-ной доверительной вероятности. Для оценки изменчивости градиента температуры в термоклине в зависимости от глубины его положения использовались аномалии градиента температуры ( $\Delta T/\Delta Z$ )' и глубины верхней границы термоклина Z. График этой зависимости показан на рис. 2в. Линейный тренд изменчивости ( $\Delta T/\Delta Z$ )' от Z' показывает, что с увеличением глубины термоклина наблюдается рост градиента температуры в нем, и, наоборот, подъем термоклина на меньшие глубины сопровождается уменьшением градиента. Этот линейный тренд значим на уровне 95%-ной доверительной вероятности.

Для предварительного объяснения деформации термоклина в зоне ОЧТ были привлечены результаты лабораторного эксперимента [10], косвенно подтвержденного в натурных условиях [11]. Он показал, что придонное гравитационное течение, распространяющееся в стратифицированной жидкости, вызывает в пограничном слое придонного течения волнообразные колебания, передающиеся в стратифицированную жидкость. Учитывая, что стрежень ОЧТ наблюдается в слое 10-25 м, а верхняя граница термоклина в зимний сезон — на глубине 40-60 м [2], можно предположить, что возмущения, вызываемые флуктуируюшим потоком, распространяются в пограничные слои в виде волновых колебаний. В рассматриваемых нами случаях верхняя граница термоклина располагалась в среднем на глубине 40-50 м, поэтому наблюдающееся изменение характеристик термоклина в зависимости от скорости течения может быть связано с волновыми процессами в пограничном слое струи ОЧТ. Данные пересекающих ОЧТ гидрологических съемок [12] показали, что при вхождении в зону ОЧТ изотермы термоклина заглубляются, что косвенно свидетельствует о справедливости приведенного предположения.

Большой разброс значений на графиках рис. 2 может быть связан с тем, что дрифтер перемещался в водных массах с различными гидрофизическими характеристиками. Поэтому для повышения точности полученных оценок необходимо проведение эксперимента с использованием стационарных (заякоренных) измерительных систем. Полученные оценки реакции сезонного термоклина на изменяющуюся скорость ОЧТ дают основание сделать вывод о том, что возрастание скорости ОЧТ вызывает заглубление термоклина, уменьшение его толщины и увеличение градиента температуры в нем. Уменьшение скорости ОЧТ, наоборот, приводит к подъему термоклина на меньшие глубины, увеличению его толщины и уменьшению градиента температуры. Этот вывод справедлив для зимнего сезона, когда ОЧТ интенсифицируется [2].

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме № 0827-2018-0001 "Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан—атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата" (Шифр "Взаимодействие океана и атмосферы") и № 0827-

2020-0002 "Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений" (Шифр "Оперативная океанология").

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ginsburg A.I., Zatsepin A.G., Kostianoy A.G., et al. Mesoscale Water Dynamics // Handbook of Environmental Chemistry. 2008. V. 5. Part Q. P. 195–215.
- 2. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011.
- 3. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Seasonal and Interannual Variability of the Black Sea Eddies and its Dependence on Characteristics of the Large—scale Circulation // Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers. 2015. V. 97. P. 80—91.
- 4. *Кривошея В.Г., Титов В.Б., Овчинников И.М. и др.* Влияние циркуляции вод и вихревых образований на глубинное положение верхней границы сероводородной зоны Черного моря // Океанология. 2000. Т. 40. № 6. С. 816—825.
- Сизов А.А., Баянкина Т.М. Особенность формирования температуры верхнего слоя Черного моря во время холодного вторжения // ДАН. 2019. Т. 487. № 4. С. 95–99. https://doi.org/10.31857/S0869-56524874443-447
- 6. Sizov A.A., Bayankina T.M., Yurovsky A.V. Study of the Process of the Black Sea Upper Layer Mixing in the Zone of the Rim Current Activity in Winter Based on the Drifters Data // Physical Oceanography. 2019. V. 26 (3). P. 260–270.
- Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Мотыжев С.В. Анализ результатов натурных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах Мирового океана // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 5. С. 9—32.
- 8. *Кубряков А.А.*, *Станичный С.В.* Восстановление средней динамической топографии Черного моря для альтиметрических измерений // Исследование Земли из космоса. 2011. № 5. С. 24—30.
- 9. *Kubryakov A.A.*, *Stanichny S.V.* Reconstruction of Mean Dynamic Topography of the Black Sea for Altimetry Measurements // Isvestiya Atmospheric and Ocean Physics. 2012. V. 48 (9). P. 973–979. https://doi.org/10.1134/S0001433812090095
- Maxworthy T., Leilich J., Simpson J.E., et al. The Propagation of a Gravity Current into a Linearly Stratified Fluid // Journal of Fluid Mechanics. 2002. V. 453. P. 371–394.
- 11. *Гриценко В.А.*, *Чубаренко И.П.* Об особенностях структуры фронтальной зоны придонных гравитационных течений // Океанология. 2010. Т. 50. № 1. С. 32—39.
- Ogus 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. V. l. 46 (10). P. 1733— 1753.

# VARIABILITY OF THERMOCLINE CHARACTERISTICS IN THE RIM CURRENT ZONE

A. A. Sizov<sup>a</sup>, T. M. Bayankina<sup>a,#</sup>, and N. E. Lebedev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences", Sevastopol', Russian Federation

#E-mail: bayankina t@mail.ru

Presented by Academician of the RAS V.M. Kotlyakov August 13, 2020

Using of data gained through drifter experiment within the Rim Current zone made it possible to obtain preliminary estimations of the thermocline reaction to a changing current velocity. It was found that an increase in the Rim Current velocity leads to a deepening of the seasonal thermocline with a simultaneous decrease of its thickness and an increase of its temperature gradient. A decrease of the Rim Current velocity causes the rise of the thermocline to shallower depths, accompanied by an increase of its thickness and a decrease of its temperature gradient. Considerations on the possible mechanism of such a process are presented.

Keywords: thermocline, geostrophic velocity, main black sea current, sub-region

2021