

Исследование процесса перемешивания верхнего слоя Черного моря в зоне действия Основного Черноморского течения в зимний период по данным дрейфтеров

А. А. Сизов*, Т. М. Баянкина, А. В. Юровский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: sizov_anatoliy@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.12.2018 г., после доработки – 14.03.2019 г.

Цель. Исследуется процесс перемешивания верхнего слоя западной части Черного моря в период повышенной теплоотдачи с его поверхности в зимний сезон. Анализируется механизм формирования средней температуры верхнего квазиоднородного слоя и слоя, лежащего глубже нижней границы сезонного термоклина.

Методы и результаты. Для расчетов использовались измерения дрейфтеров с термокосой, а также данные реанализа *MERRA* и результаты расчетов по региональной модели *RegCM4* с входными данными реанализа *ERA-Interim* за 2012–2014 гг. Установлено, что увеличение скорости ветра и суммарной теплоотдачи с поверхности моря сопровождалось возрастанием скорости течения, которое приводило к интенсификации турбулентного перемешивания верхнего слоя глубиной 40–50 м и понижению его средней температуры. Получено, что усиление скорости течения приводило к заглублению сезонного термоклина и холодного промежуточного слоя, а ее ослабление вызывало подъем на меньшие глубины холодных вод с нижней границы верхнего квазиоднородного слоя. Одновременно наблюдалось уменьшение глубины залегания холодного промежуточного слоя. Это приводило к тому, что при ослаблении скорости течения средняя температура верхнего квазиоднородного слоя понижалась, а температура слоя, расположенного под сезонным термоклином, повышалась.

Выводы. Интенсификация скорости течения вызывает заглубление сезонного термоклина и холодного промежуточного слоя, а ее ослабление приводит к подъему этих слоев на меньшие глубины. В результате этого процесса происходит понижение средней температуры верхнего квазиоднородного слоя.

Ключевые слова: Основное Черноморское течение, верхний квазиоднородный слой, холодный промежуточный слой, сезонный термоклин, атмосферный форсинг.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата». Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук, профессору В. В. Ефимову за обсуждения материалов и полученных результатов, а также рецензенту – за полезные замечания.

Для цитирования: Сизов А. А., Баянкина Т. М., Юровский А. В. Исследование процесса перемешивания верхнего слоя Черного моря в зоне действия Основного Черноморского течения в зимний период по данным дрейфтеров // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 3. С. 287–298. doi:10.22449/0233-7584-2019-3-287-298

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

A. A. Sizov*, T. M. Bayankina, A. V. Yurovsky

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
*e-mail: sizov_anatoliy@mail.ru

Purpose. The process of the upper layer mixing in the western Black Sea during the heightened heat transfer from its surface in the winter season is studied. The mechanism forming average temperature both in the upper mixed layer and in the layer below the lower boundary in the seasonal thermocline is analyzed.

Methods and Results. Measurements of the thermistor chain drifters as well as the MERRA reanalysis data and the simulation results of the regional model RegCM4 which included the ERA-Interim reanalysis (2012–2014) data as the input information, were involved in the calculations. It is revealed that growth of the wind speed and the total heat transfer from the sea surface was accompanied by increase of the current velocity that resulted in intensification of turbulent mixing in the upper layer (40–50 m depth) and lowering of its average temperature. It is also found out that increase of the current velocity was followed by deepening of the seasonal thermocline and cold intermediate layer; whereas its decrease contributed to elevation of cold waters from the lower boundary of the upper mixed layer to the smaller depths. At the same time, diminution of the cold intermediate layer depth was observed. At lowering of the current velocity, this resulted in decrease of the upper mixed layer average temperature, and growth of the temperature in the layer below the seasonal thermocline.

Conclusions. The current velocity intensification induces deepening of the seasonal thermocline and the cold intermediate layer; whereas its decrease promotes elevation of these layers to smaller depths. This process results in lowering of the upper mixed layer average temperature.

Keywords: Rim Current, upper mixed layer, cold intermediate layer, seasonal thermocline, atmospheric forcing.

Acknowledgements: The investigation is carried out within the framework of the state task on theme № 0827-2018-0001 “Fundamental studies of interaction processes in the ocean-atmosphere system conditioning regional spatial-temporal variability of natural environment and climate”. The authors are grateful to Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor V.V. Efimov for discussing the data and the obtained results as well as to the reviewer for his helpful remarks.

For citation: Sizov, A.A., Bayankina, T.M. and Yurovsky, A.V., 2019. 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*, [e-journal] 26(3), pp. 260-270. doi:10.22449/1573-160X-2019-3-260-270

Введение

Верхний перемешанный слой моря интенсивно формируется в зимний сезон, когда активизируются процессы турбулентного обмена и конвекции. Температура верхнего слоя формируется под влиянием сдвига скорости течения и конвекции^{1, 2}. Ветровое перемешивание и конвекция зависят от условий атмосферной циркуляции, которая заметно меняется как на межгодовом, так и на десятилетнем масштабах [1–5]. Изменчивость тепловых и динамических процессов в приводной атмосфере Черного моря создает соответствующие условия теплоотдачи с его поверхности, что приводит к межгодовым колебаниям теплозапаса верхнего слоя [5, 6].

¹ Булгаков Н. П. Конвекция в океане. М. : Наука, 1975. 272 с.

² Конвективное перемешивание в море / Под ред. А. Д. Добровольского. М. : Изд-во Московского университета, 1977. 239 с.

Процессы перемешивания в этом слое связаны с динамикой Основного Черноморского течения (ОЧТ), интенсификация и ослабление которого достаточно надежно воспроизводятся по данным спутниковой альтиметрии [7–9]. В последние годы для исследования тепловых процессов в верхнем слое моря стали широко использоваться дрейфующие буи с термокосой (дрифтеры) [10]. Данные измерений с дрифтеров позволяют исследовать процессы формирования теплового состояния верхнего слоя моря и механизмы обмена в зоне действия ОЧТ.

Цель настоящей работы заключается в исследовании процесса зимнего перемешивания верхнего слоя западной части Черного моря в зоне действия ОЧТ по данным дрифтеров.

Данные и методика исследования

Анализ процесса перемешивания верхнего слоя моря, включающего верхний квазиоднородный слой (ВКС) и холодный промежуточный слой (ХПС), проводился по данным, полученным с использованием дрифтеров с термокосой (*SVP_BTC80*) [10]. Исходные данные дрифтеров о температуре в слое 0,2–80 м брались из базы океанографических данных Морского гидрофизического института (МГИ). Учитывая цель работы, выбирались случаи, когда дрифтеры типа *SVP_BTC80* проводили измерения в западной части моря в условиях переменной теплоотдачи с поверхности при скорости ветра различной интенсивности. Один дрифтер (№ 249940) находился в северной ветви ОЧТ и проводил измерения 14–31 декабря 2012 г. в условиях относительно слабого холодного вторжения. Эти условия обеспечивались выходом в западную часть Черного моря холодного фронта циклона. Второй дрифтер (№ 248990) находился в южной ветви ОЧТ 26 января – 10 февраля 2014 г. и работал в условиях сильного холодного вторжения арктических воздушных масс (арктическое вторжение) в северную часть моря. Термокосы дрифтеров позволяли измерять температуру верхнего слоя через каждые 5 м. Изменчивость дрейфовой V и геострофической V_g компонент скорости ОЧТ оценивалась по данным о приземном ветре и материалам спутниковой альтиметрии [11–13].

Оценка скорости приземного ветра и потока явного и скрытого тепла с поверхности моря ($H+LE$), $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, делалась по данным массива реанализа *MERRA* (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?page=1>) и регионального реанализа по модели *RegCM4* [14]. Холодное вторжение определялось по температуре воздуха и скорости ветра из данных этих реанализов. Температура поверхности моря выбиралась из массива реанализа *NOAA ESRL* (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>), геострофическая скорость и скорость поверхностного течения в зоне действия ОЧТ – из массива данных, размещенных на морском портале сайта МГИ (<https://mhi-ras.ru>).

Полученные результаты

Схема положения дрифтеров показана на рис. 1. Видно, что их траектории в северной и южной ветвях ОЧТ не связаны с их захватом синоптическими вихрями. Анализируемые дрифтеры увлекались потоком ОЧТ, и этим во многом определялась структура изменчивости поля температуры ВКС

и динамика сезонного термоклина и ХПС. Для анализа выбирались данные измерений, полученные при скорости ветра, превышающей $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, и отрицательной температуре воздуха (условия холодного вторжения). Были выбраны холодное вторжение в тылу циклона 17–21 декабря 2012 г. при средней температуре воздуха $-3,4^\circ\text{C}$ и скорости ветра $10,6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а также арктическое вторжение 29 января – 3 февраля 2014 г. при средней температуре воздуха $-9,3^\circ\text{C}$ и скорости ветра $11,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

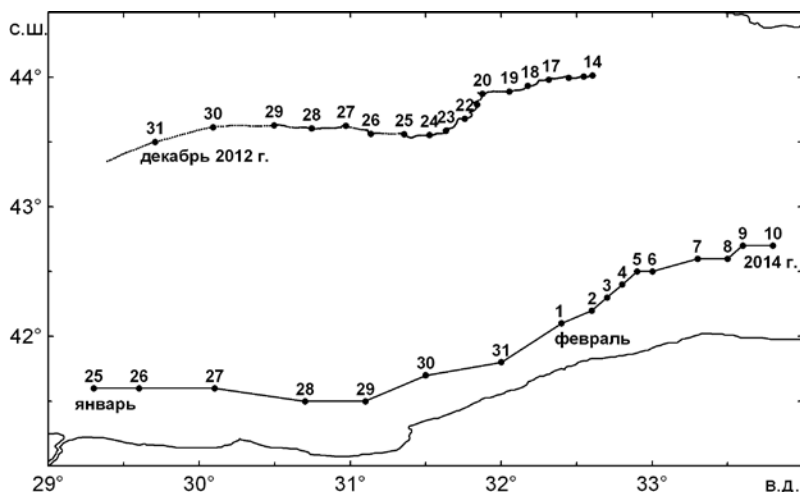
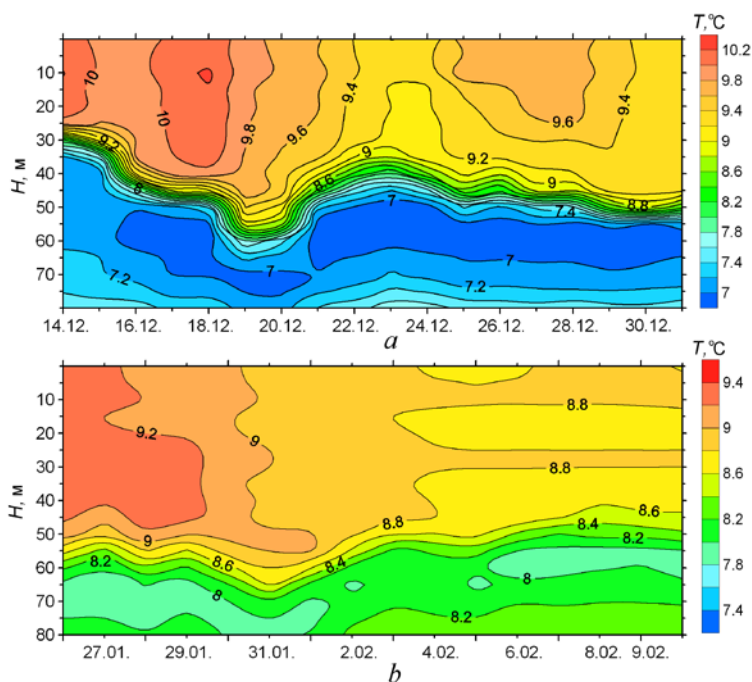


Рис. 1. Схема перемещения дрейфтеров в северной (2012 г.) и южной (2014 г.) ветвях ОЧТ
Fig. 1. Scheme of the drifters' movement in the northern (2012) and (2014) southern (2014) branches of the Rim Current

Рассмотрим изменчивость температуры верхнего слоя моря в зоне действия северной и южной ветвей ОЧТ (рис. 2). Положение изотерм в северной ветви при холодном вторжении 17–21 декабря 2012 г. (рис. 2, а) свидетельствует о заметном понижении температуры ВКС, за нижнюю границу которого принималась изотерма 9°C . По данным реанализа *MERRA*, разность между температурой воды и воздуха $\Delta T = T_w - T_a$ в точке нахождения дрейфтера была максимальной (более 4°C) 21–23 декабря. В то же время максимальная скорость ветра ($8\text{--}12 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) наблюдалась 18–20 декабря. Именно 19 и 20 декабря через район локализации дрейфтера проходил холодный фронт циклона с северо-восточным ветром. Он и обеспечил максимальную теплоотдачу с поверхности моря (табл. 1). Это приводило к тому, что в результате перемешивания температура ВКС понижалась 17–19 декабря на $0,13^\circ\text{C}$ в сутки. Примерно такое же понижение температуры ВКС наблюдалось и в южной ветви ОЧТ. В этом случае за нижнюю границу ВКС принималась изотерма $8,5^\circ\text{C}$. Здесь максимальные значения ΔT ($2,6\text{--}4,5^\circ\text{C}$) наблюдались 30 января – 1 февраля 2014 г., а максимальные скорости ветра ($9\text{--}10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) были зафиксированы 2 и 3 февраля. Поэтому максимальная теплоотдача с поверхности моря наблюдалась 30 января – 3 февраля (табл. 1), в результате чего средняя температура ВКС понижалась на $0,07^\circ\text{C}$ в сутки.



Р и с. 2. Временной ход температуры верхнего слоя моря в северной (а) и южной (b) ветвях ОЧТ в 2012 г. и 2014 г. соответственно

Fig. 2. Temporal temperature variability of the sea upper layer in the northern (a) and southern (b) branches of the Rim Current in 2012 and 2014, respectively

В табл. 1 подчеркнуты значения суммарного потока тепла во время холодных вторжений, при которых происходило значительное понижение средней температуры верхнего слоя моря.

Как хорошо видно на рис. 2, а, дрейфтер, перемещаясь в ОЧТ, фиксировал заметное изменение температуры ВКС: 18–24 декабря 2012 г. она понижалась (табл. 1). Однако суммарная теплоотдача с поверхности моря, обеспечивающая выхолаживание морской поверхности, возрастала только 17–19 декабря, а затем понижалась вплоть до 28 декабря. Как следует из табл. 1, средняя температура ВКС продолжала уменьшаться до 24 декабря, после чего стала расти. Понижение температуры ВКС 17–19 декабря (рис. 2, а) составляло в среднем $0,13^{\circ}\text{C}$ в сутки (табл. 1). Столь значительное понижение температуры верхнего 40-метрового слоя происходило вследствие возраставшей на $30 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ в сутки теплоотдачи с поверхности моря.

Рассмотрим процессы, которые наблюдались в ВКС в районе южной ветви ОЧТ (рис. 2, b, табл. 1). Видно, что температура водных масс здесь более однородна. По-видимому, это связано с тем, что дрейфтер в 2014 г. проводил измерения в середине зимы, когда верхний слой моря хорошо перемешан. Но и в этом случае, как в декабре 2012 г., хорошо выделяются особенности в положении изотерм, связанные с перемешиванием ВКС при возрастании скорости ветра и суммарной теплоотдачи с поверхности моря. Здесь также наблюдалось быстрое понижение средней температуры ВКС (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Изменчивость средней температуры ВКС в зависимости от суммарного потока тепла ($H+LE$)
Variability of the upper mixed layer (UML) average temperature depending on the total heat flow ($H+LE$)

Дата / Date	$(H+LE)$, Вт·м ⁻² (в точке дрейтера) / $(H+LE)$, W·m ⁻² (in drifter point)	T_{cp} , °C (ВКС) / T_{av} , °C (UML)	Дата / Date	$(H+LE)$, Вт·м ⁻² (в точке дрейтера) / $(H+LE)$, W·m ⁻² (in drifter point)	T_{cp} , °C (ВКС) / T_{av} , °C (UML)
Северная ветвь ОЧТ / Northern branch of the Rim Current			Южная ветвь ОЧТ / Southern branch of the Rim Current		
14.12.2012	120	10,18	26.01.2014	50	9,25
15.12.2012	130	9,92	27.01.2014	75	9,26
16.12.2012	170	9,84	28.01.2014	50	9,24
17.12.2012	<u>140</u>	10,06	29.01.2014	<u>50</u>	9,20
18.12.2012	<u>180</u>	10,16	30.01.2014	<u>100</u>	9,07
19.12.2012	<u>200</u>	9,79	31.01.2014	<u>100</u>	8,94
20.12.2012	180	9,65	01.02.2014	<u>100</u>	8,90
21.12.2012	140	9,58	02.02.2014	<u>120</u>	8,86
22.12.2012	110	9,36	03.02.2014	120	8,85
23.12.2012	130	9,18	04.02.2014	70	8,79
24.12.2012	80	9,12	05.02.2014	70	8,78
25.12.2012	58	9,46	06.02.2014	50	8,78
26.12.2012	20	9,49	07.02.2014	35	8,79
27.12.2012	25	9,51	08.02.2014	20	8,77
28.12.2012	20	9,56	09.02.2014	10	8,79
–	–	–	10.02.2014	0	8,79

Одной из особенностей в изменении положения изотерм, по которым определялась верхняя граница сезонного термоклина: 9,0°C (декабрь 2012 г.) и 8,5°C (январь – февраль 2014 г.), является их заглубление во время возросших значений суммарной теплоотдачи с поверхности моря и скорости ветра (атмосферный форсинг), а также подъем на меньшие глубины во время уменьшения атмосферного форсинга (рис. 2, табл. 1). Характерный изгиб изотерм 9,2°C (23–24 декабря) и 8,8°C (3–4 февраля) свидетельствует об их подъеме на меньшие глубины. Этот процесс можно представить как проявление колебательного движения системы «сезонный термоклин – ХПС», выведенной из состояния равновесия атмосферным форсингом.

В рассматриваемых случаях скорость перемещения дрейтеров регулировалась скоростью ОЧТ. Как показано на рис. 1, *b*, дрейтер в южной ветви перемещался в зональном направлении. При этом при интенсификации атмосферного форсинга (29 января – 3 февраля) скорость перемещения дрейтера заметно менялась: 29 января – 1 февраля она в среднем составляла

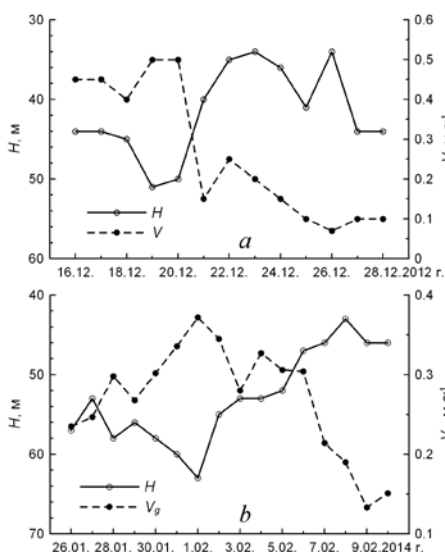
0,5 м·с⁻¹, 1–3 февраля уменьшилась до 0,15 м·с⁻¹ и оставалась такой до 6 февраля. Скорость ветра для этого района моря, взятая из реанализа *MERRA*, 29 января – 3 февраля оставалась высокой (8–10 м·с⁻¹), но направление заметно менялось: 29–31 января оно совпадало с направлением ОЧТ, а 1–3 февраля сменилось на восточное. Эти локальные изменения направления ветра могут служить объяснением изменения скорости ОЧТ и скорости перемещения дрейфера. Но, как показано на рис. 2, *b*, одновременно с изменением скорости ОЧТ изменялась и глубина залегания верхней границы сезонного термоклина. Рассмотрим этот процесс подробнее.

В северной ветви ОЧТ, где верхняя граница сезонного термоклина находилась на глубине около 40 м, изменение глубины залегания термоклина и ХПС заметно зависело от флуктуации скорости поверхностного течения. Сравнение средних за 16–28 декабря 2012 г. значений скоростей показало, что скорость поверхностного течения ($V = 0,26$ м·с⁻¹) примерно в два раза превышала геострофическую ($V_g = 0,14$ м·с⁻¹). По-видимому, этим можно объяснить незначимую корреляцию геострофической скорости с глубиной залегания верхней границы сезонного термоклина. Глубина залегания сезонного термоклина и скорость поверхностного течения значимо коррелировали (коэффициент корреляции равен $-0,74$).

На рис. 3, *a* показано изменение глубины залегания верхней границы сезонного термоклина в зависимости от скорости поверхностного течения. Сравнивая рис. 2, *a* и 3, *a*, видим, что скорость поверхностного течения стала увеличиваться с 15 декабря 2012 г. и достигла максимума 19–20 декабря (0,5 м·с⁻¹), а верхняя граница сезонного термоклина, последовательно заглубляясь, вышла к этому времени на максимальную глубину 45 м. Затем 21–23 декабря скорость поверхностного течения понизилась в среднем до 0,2 м·с⁻¹, что вызвало подъем сезонного термоклина и ХПС на меньшие глубины (рис. 2, *a*). Последующее ослабление скорости поверхностного течения до 0,1 м·с⁻¹ относительно слабо влияло на изменение глубины залегания изотерм, ограничивающих сезонный термоклин.

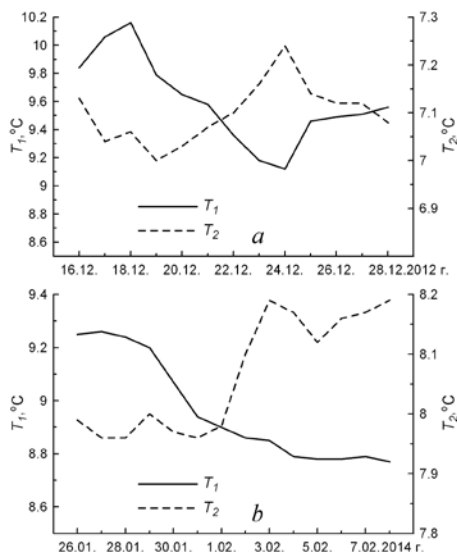
В южной ветви ОЧТ процесс деформации изотерм в зависимости от флуктуации скорости течения происходил по аналогичной схеме. Разница заключалась только в том, что в этом случае 26 января – 10 февраля 2014 г. средние значения геострофической скорости ($V_g = 0,26$ м·с⁻¹) и скорости поверхностного течения ($V = 0,22$ м·с⁻¹) были примерно равны. Поэтому в силу выполнения условия геострофического приспособления поля скорости к полю плотности (или к полю уровня моря) корреляция геострофической скорости и глубины залегания верхней границы сезонного термоклина была значима на уровне 95% доверительной вероятности и равнялась $-0,72$.

На рис. 3, *b* показано изменение глубины залегания верхней границы сезонного термоклина в зависимости от геострофической скорости. Хорошо видно, что начиная с 28 января геострофическая скорость стала увеличиваться, достигнув своего максимума 31 января – 1 февраля (0,4 м·с⁻¹), после чего уменьшилась до 0,15 м·с⁻¹. Сравнивая рис. 3, *b* и 2, *b*, видим, что увеличение геострофической скорости привело к заглублению сезонного термоклина и ХПС, а ослабление скорости течения – к подъему границ залегания сезонного термоклина и ХПС на меньшие глубины. Этот подъем, как следует из рис. 2, *b*, привел к понижению средней температуры ВКС, ограниченного глубиной залегания изотермы 8,5°C.



Р и с. 3. Положение верхней границы сезонного термоклина в зависимости от скорости поверхностного течения V и геострофической скорости V_g в северной (a) и южной (b) ветвях ОЧТ

F i g. 3. Position of the seasonal thermocline upper boundary depending on the surface current velocity V and the geostrophic velocity V_g in the northern (a) and southern (b) branches of the Rim Current



Р и с. 4. Средняя температура ВКС T_1 и в слое под сезонным термоклином T_2 в северной (a) и южной (b) ветвях ОЧТ

F i g. 4. Average temperature in the upper mixed layer T_1 and in the layer below the seasonal thermocline T_2 in the northern (a) and southern (b) branches of the Rim Current

В северной ветви ОЧТ ослабление поверхностного течения 21–23 декабря 2012 г. (рис. 2, a ; 3, a) привело к уменьшению толщины ВКС, которое сопровождалось понижением его средней температуры (рис. 2, a). Нагляднее процесс изменения температуры хорошо иллюстрируется на рис. 4, где показаны ее средние значения в ВКС и под сезонным термоклином для северной (рис. 4, a) и южной (рис. 4, b) ветвей ОЧТ. Видно, что перемешивание верхнего слоя моря за счет повышенного суммарного потока тепла и возросшей скорости ветра сопровождалось увеличением скорости ОЧТ, что привело к понижению средней температуры ВКС и заглублению сезонного термоклина и ХПС. Уменьшение скорости ОЧТ вызывало подъем сезонного термоклина и ХПС на меньшие глубины.

Обсуждение результатов

В работе [15] было высказано предположение, что зона ОЧТ оказывает определяющее влияние на вентиляцию аэробного слоя моря. Учитывая, что в январе – феврале ОЧТ максимально интенсифицировано [9], был проведен анализ реакции теплового состояния верхнего слоя моря на изменяющуюся скорость переноса в ОЧТ в зимний сезон. Рассматривались особенности

перемешивания в северной и южной ветвях ОЧТ в западной части моря. Полученные результаты могут характеризовать процессы перемешивания для всего моря, поскольку в январе – марте наблюдается единое циклоническое вращение водных масс [5]. Эта циклоническая циркуляция верхнего слоя определяется завихренностью касательного напряжения трения приземного ветра, основной вклад в которую дают муссонный и орографический эффекты [16–18]. Вообще преобладающее в северной части моря в течение года направление ветра (северное и северо-восточное) формирует циклоническую циркуляцию вод [9], а межгодовая и синоптическая изменчивость циркуляции атмосферы в регионе Черного моря регулирует повторяемость и силу ветра различных румбов в его западной части [2, 9]. Поэтому рассмотренный нами случай арктического вторжения (январь – февраль 2014 г.) соответствовал ситуации, когда над северной частью моря в течение нескольких суток наблюдался ветер северо-восточного направления. Этот ветер через дрейфовую компоненту увеличивал скорость течения, и поэтому в южной ветви ОЧТ отмечалась значимая корреляция скорости ветра и глубины залегания сезонного термоклина ($r = -0,75$).

Важным обстоятельством в процессе перемешивания как при холодном вторжении в тылу циклона, так и при арктическом вторжении являлось то, что средняя температура верхнего слоя понижалась за очень короткое время. В зависимости от скорости ветра и разности температуры вода – воздух происходило выхолаживание поверхности моря, и за счет механизма конвекции и турбулентного перемешивания, усиленного сдвигом скорости течения в верхнем слое, понижалась температура ВКС. Оценки показывают, что в северной ветви ОЧТ в период повышенной суммарной теплоотдачи с поверхности моря и возросшей скорости ветра (17–19 декабря 2012 г.) понижение средней температуры верхнего слоя на $0,1^{\circ}\text{C}$ в сутки происходило при среднесуточном значении $(H+LE)$, равном примерно $17 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$. Аналогичные оценки, выполненные для южной ветви ОЧТ в период интенсивного атмосферного форсинга (29 января – 3 февраля 2014 г.), показали, что при среднесуточном значении $(H+LE)$, равном примерно $19 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, происходило понижение средней температуры 55-метрового верхнего слоя моря на $0,1^{\circ}\text{C}$ в сутки. Как видим, значения суммарного потока тепла, вызывающие понижение температуры ВКС на $0,1^{\circ}\text{C}$ как в северной, так и в южной ветвях ОЧТ, близки.

Геострофическая и поверхностная скорости, вычисленные по данным спутниковой альтиметрии и оперативной модели *NOMADS.NOAA* [11], позволили сопоставить изменяющуюся со временем скорость ОЧТ в точке нахождения дрейфера с флуктуацией средней температуры как в ВКС, так и в слое, расположенном глубже нижней границы сезонного термоклина. Из рис. 3, *a, b* следует, что глубина залегания сезонного термоклина и ХПС изменяется в зависимости от скорости течения. В северной ветви ОЧТ (декабрь 2012 г.) при неустойчивом направлении приземного ветра глубины залегания сезонного термоклина и ХПС регулировались скоростью поверхностного течения. Возможно, это связано с тем, что скорость поверхностного течения в этом случае была примерно в два раза выше геострофической. При возрастании скорости поверхностного течения термоклин и ХПС заглубля-

лись, при ослаблении оба слоя поднимались на меньшие глубины. Тот же процесс изменения глубины залегания сезонного термоклина и ХПС наблюдался и в южной ветви ОЧТ (январь – февраль 2014 г.). Разница состоит в том, что в этом случае геострофическая скорость и скорость поверхностного течения были равны и процесс изменения глубины залегания сезонного термоклина и ХПС регулировался геострофической скоростью. Сам процесс деформации сезонного термоклина и ХПС можно представить как колебание системы «сезонный термоклин – ХПС», выведенной из равновесия изменяющимся атмосферным форсингом (который сопровождался изменением скорости ОЧТ).

При повышении суммарной теплоотдачи с поверхности моря и увеличении скорости ветра как в северной, так и в южной ветвях ОЧТ перемешивание понижает среднюю температуру верхнего слоя. При уменьшении скорости ОЧТ сезонный термоклин и ХПС поднимаются на меньшие глубины. При этом, как показано на рис. 2–4, изотермы, характеризующие температуру на границах залегания ВКС и ХПС, поднимаются на меньшие глубины, что приводит к понижению средней температуры ВКС и повышению средней температуры слоя, расположенного под сезонным термоклином.

В табл. 2 показаны разности средних температур в ВКС и в слое под сезонным термоклином во время роста и уменьшения скорости ОЧТ. Для северной ветви при росте скорости течения разность температур ΔT получалась вычитанием средней температуры за 18 января из средней температуры за 20 января 2012 г., для южной ветви $\Delta T = T(31 \text{ января}) - T(29 \text{ января } 2014 \text{ г.})$. Для периода ослабления скорости течения в северной ветви $\Delta T = T(24 \text{ декабря}) - T(21 \text{ декабря } 2012 \text{ г.})$, в южной ветви $\Delta T = T(4 \text{ февраля}) - T(1 \text{ февраля } 2014 \text{ г.})$.

Т а б л и ц а 2
Table 2

Изменение разности температур ΔT в ВКС и под сезонным термоклином во время роста и уменьшения скорости ОЧТ
Change of temperature difference ΔT in the upper mixed layer (UML) and below the seasonal thermocline during increase and decrease of the Rim Current (RC) velocity

Изменение скорости ОЧТ / Change of RC velocity	$\Delta T, ^\circ\text{C}$ (ВКС) / $\Delta T, ^\circ\text{C}$ (UML)	$\Delta T, ^\circ\text{C}$ (под термокли- ном) / $\Delta T, ^\circ\text{C}$ (below ther- mocline)	$\Delta T, ^\circ\text{C}$ (ВКС) / $\Delta T, ^\circ\text{C}$ (UML)	$\Delta T, ^\circ\text{C}$ (под термокли- ном) / $\Delta T, ^\circ\text{C}$ (below ther- mocline)
	Северная ветвь ОЧТ / Northern branch of the Rim Current		Южная ветвь ОЧТ / Southern branch of the Rim Current	
Рост / Increase	-0,51	-0,03	-0,26	-0,04
Уменьшение / Decrease	-0,46	0,17	-0,11	0,19

Сравнивая значения ΔT в табл. 2 и на рис. 2, 4, видим, что как в северной, так и в южной ветвях ОЧТ температура ВКС понижалась не только во время усиления атмосферного форсинга (при росте скорости течения), но и после

его прекращения. При этом основное понижение температуры во время роста скорости течения происходило в ВКС, а под сезонным слоем скачка процесс перемешивания был ослаблен. Это согласуется с [15], где показано, что под сезонным термоклином интенсивность перемешивания уменьшается почти в два раза по сравнению с ВКС. При уменьшении скорости течения температура в ВКС продолжала понижаться, а в слое под сезонным термоклином средняя температура повышалась.

Выводы

Данные о температуре, полученные с использованием дрейфтеров, показали, что механизм формирования пониженной температуры ВКС в западной части Черного моря в зимний сезон как в северной, так и в южной ветвях ОЧТ примерно одинаков. Значение $(H+LE)$, определяющее понижение температуры ВКС в течение суток на $0,1^{\circ}\text{C}$ в северной и южной ветвях ОЧТ, составляет $17\text{--}19 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$. Но для объяснения интенсивности перемешивания ВКС в зоне действия ОЧТ необходимы дополнительные исследования с использованием заякоренных измерительных систем. Такие исследования нужны и для исключения влияния на полученные оценки изменяющихся характеристик водных масс, в которых перемещается дрейфтер.

Другой особенностью полученных результатов является зависимость глубины перемешивания и температуры верхнего слоя моря от скорости течения. Как в северной, так и в южной ветвях интенсификация ОЧТ приводит к заглублению сезонного термоклина и ХПС, а ослабление ОЧТ – к их подъему на меньшие глубины. Результатом этого процесса является продолжение понижения температуры ВКС при ослаблении ОЧТ с одновременным повышением температуры в слое, расположенном глубже сезонного термоклина. Таким образом, зимний атмосферный форсинг в зоне действия ОЧТ, связанный с холодным вторжением различной интенсивности, формирует пониженную температуру ВКС. Принимая во внимание, что ширина зоны ОЧТ составляет $40\text{--}80 \text{ км}$, а расстояние, на которое смещается дрейфтер за время от начала до окончания атмосферного форсинга в северной ветви ОЧТ, оценивается в 50 км , можно ожидать, что в верхнем слое моря в зоне ОЧТ могут образовываться линзы вод с пониженной температурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кривошея В. Г., Овчинников И. М., Скирта А. Ю.* Межгодовая изменчивость обновления холодного промежуточного слоя Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря // Отв. ред. А. Г. Зацепин, М. В. Флинт. М. : Наука, 2002. С. 27–39.
2. *Titov V. B.* Effect of multiannual variability of climatic conditions on the hydrological structure and interannual renewal of the cold Intermediate layer in the Black Sea // *Oceanology*. 2003. Vol. 43, no. 2. P. 164–172.
3. *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*. 2010. Vol. 20, iss. 5. P. 347–355.
4. *Белокопытов В. Н.* Климатическая изменчивость плотностной структуры Черного моря // Украинский гидрометеорологический журнал. 2014. № 14. С. 227–235. URL: <http://uhmj.odetu.edu.ua/klimaticheskaya-izmenchivost-plotnostnoj-struktury-chernogo-morya/> (дата обращения: 15.12.2018).

5. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря // Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
6. *Баянкина Т. М., Сизов А. А., Юровский А. В.* О роли холодных вторжений в формировании аномалий зимней поверхностной температуры Черного моря // Процессы в геосредах. 2017. № 3 (12). С. 565–572.
7. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Mesoscale eddies in the Black Sea from Satellite Altimetry data // *Oceanology*. 2015. Vol. 55, iss. 1. P. 56–67. doi:10.1134/S0001437015010105
8. *Mesoscale Water Dynamics / A. I. Ginsburg [et al.] // The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*. 2006. Vol. 5Q. P. 195–215. doi:10.1007/698_5_062
9. *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. Vol. 97. P. 80–91. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2014.12.002> (дата обращения: 15.12.2018).
10. *Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В.* Анализ результатов натуральных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах Мирового океана // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 5. С. 9–32.
11. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Reconstruction of mean dynamic topography of the Black Sea for altimetry measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics*. 2012. Vol. 48, iss. 9. P. 973–979. doi:10.1134/S0001433812090095
12. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Estimating the quality of the retrieval of the surface geostrophic circulation of the Black Sea by satellite altimetry data based on validation with drifting buoy measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics*. 2013. Vol. 49, iss. 9. P. 930–938. doi:10.1134/S0001433813090089
13. *Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem / A. A. Kubryakov [et al.] // Journal of Marine Systems*. 2016. Vol. 163. P. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.06.006>
14. *Anisimov A. E., Yarovaya D. A., Barabanov V. S.* Reanalysis of atmospheric circulation for the Black Sea-Caspian region // *Physical Oceanography*. 2015. No. 4. P. 13–25. doi:10.22449/1573-160X-2015-4-13-25
15. *Podymov O. I., Zatsepin A. G., Ostrovsky A. G.* Vertical turbulent exchange in the Black Sea pycnocline and its relation to water dynamics // *Oceanology*. 2017. Vol. 57, iss. 4. P. 492–504. doi:10.1134/S0001437017040142
16. *Efimov V. V., Yurovsky A. V.* Formation of Vorticity of the Wind Speed Field in the Atmosphere over the Black Sea // *Physical Oceanography*. 2017. Iss. 6. P. 3–11. doi:10.22449/1573-160X-2017-6-3-11
17. *Efimov V. V., Mikhaylova N. V.* The mesoscale atmospheric vortex as a manifestation of the Novorossiysk Bora // *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics*. 2017. Vol. 53, iss. 4. P. 449–458. doi:10.1134/S000143381704003X
18. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Volkov D. L.* Quantifying the impact of basin dynamics on the regional sea level rise in the Black Sea // *Ocean Science*. 2017. Vol. 13, iss. 3. P. 443–452. doi:10.5194/os-13-443-2017

Об авторах:

Сизов Анатолий Александрович, старший научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9055-4768**, sizov_anatoliy@mail.ru

Баянкина Татьяна Михайловна, научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ResearcherID: G-2535-2019**, bayankina_t@mail.ru

Юровский Александр Васильевич, научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ResearcherID: S-1551-2019**, a_yurovsky@mail.ru