

Численное моделирование апвеллинга у Южного берега Крыма 24–25 сентября 2013 года

В. В. Ефимов, Д. А. Яровая *, В. С. Барабанов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: darik777@mhi-ras.ru

Аннотация

При помощи совместной мезомасштабной модели море – атмосфера *NOW (NEMO-OASIS-WRF)* с разрешением 2 км изучен один из случаев ветрового прибрежного апвеллинга в Черном море у Южного берега Крыма 24–25 сентября 2013 г. Модель *NOW* успешно воспроизвела резкое понижение температуры поверхности моря на 10 °С в течение двух суток. Повышенное пространственное разрешение при моделировании позволило выделить особенности апвеллинга, связанные с рельефом и очертаниями береговой линии. В частности, выделены мелкомасштабные области понижения температуры там, где ветер направлен вправо вдоль берега, например над морем вблизи гор Южного берега Крыма. В то же время там, где прибрежный ветер имеет другое направление, апвеллинг отсутствует, например в северо-западной части Каркинитского залива, на побережье севернее Севастополя, а также на азовском побережье. Показано наличие в море вертикальной ячейки циркуляции, связанной с апвеллингом: подъем сезонного термоклина вблизи берега, отток теплой воды в квазиоднородном слое и опускание на расстоянии ~ 30–50 км от берега. Обнаружена суточная периодичность в изменении прибрежного течения, связанная с влиянием бризовой циркуляции: в дневные часы нормальная к берегу компонента скорости течения максимальна, а вдольбереговая достигает максимума с запаздыванием на 4–6 ч.

Ключевые слова: мезомасштабное совместное моделирование, ветровой апвеллинг, вертикальная структура полей скорости и температуры в море, сезонный термоклин, Черное море, Южный берег Крыма

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта № 0555-2021-0002 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

Для цитирования: Ефимов В. В., Яровая Д. А., Барабанов В. С. Численное моделирование апвеллинга у Южного берега Крыма 24–25 сентября 2013 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 6–19. EDN SSUZYG. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-6-19

© Ефимов В. В., Яровая Д. А., Барабанов В. С., 2023



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

Numerical Modelling of Upwelling near the South Coast of Crimea on 24–25 September 2013

V. V. Efimov, D. A. Iarovaia *, V. S. Barabanov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: darik777@mhi-ras.ru

Abstract

Using 2-km resolution coupled air-sea mesoscale model NOW (NEMO-OASIS-WRF), we studied a case of upwelling in the Black Sea near the South coast of Crimea on 24–25 September 2013. The NOW model successfully reproduced a sharp decrease of sea surface temperature (SST) by 10 °C within two days. The high spatial resolution in the model allowed us to describe upwelling features resulting from the orography and shape of the coastline. In particular, we found small-scale areas of low SST near the coast where surface wind is directed along the coast to the right, for example over the sea near the coastal Crimean Mountains. At the same time the upwelling does not occur in the areas where the coastal wind has another direction, for example in the north-western part of Karkinit Bay, near the coast north to Sevastopol, and near the Azov coast. It is shown that there is a vertical circulation cell in the sea caused by the upwelling: a rise of the seasonal thermocline near the shore, outflow of warm water in the upper quasi-homogenous layer and descend of water at the 30–50 km distance from the shore. We found that the coastal current has diurnal variation due to breeze circulation: the velocity component perpendicular to the coast reaches its maximum during the daylight hours, whereas velocity component directed along the coast reaches its maximum with a delay of 4–6 hours.

Keywords: mesoscale coupled modelling, wind upwelling, vertical structure of velocity and temperature fields in sea, seasonal thermocline, Black Sea, South Coast of Crimea

Acknowledgements: The work was performed under project no. 0555-2021-0002 “Fundamental studies of processes of interaction in the ocean – atmosphere system which determine the regional spatial-temporal variability of the natural environment and climate”.

For citation: Efimov, V.V., Iarovaia, D.A. and Barabanov, V.S., 2023. Numerical Modelling of Upwelling near the South Coast of Crimea on 24–25 September 2013. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 6–19. EDN SSUZXG. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-6-19

Введение

Апвеллинги в приповерхностном прибрежном слое моря являются относительно частым явлением для Южного берега Крыма (ЮБК). Сам физический механизм прибрежного ветрового апвеллинга – экмановский перенос вод от берега в сторону моря, вызываемый западным вдольбереговым ветром, – достаточно очевиден. В теплый период года это приводит к подъему холодных глубинных вод и значительным понижениям температуры поверхности моря (ТПМ) [1]. В результате приповерхностные воды обогащаются биогенными элементами и образуется богатая питательная среда для фито- и зоопланктона. Понижения температуры моря в прибрежных областях влияют на погоду и климат прилегающей суши.

Однако это простое представление о ветровом экмановском апвеллинге в прибрежных областях не всегда подходит для описания конкретных при-

родных явлений. Целый ряд факторов приводит к искажению пространственно-временной структуры прибрежного апвеллинга, а во многих случаях – к появлению новых механизмов его возникновения. Простая картина развития ветрового апвеллинга усложняется при учете влияния неоднородностей рельефа дна в прибрежной и шельфовой областях моря, сезонной и синоптической изменчивости поля ветра, особенностей бароклинного слоя моря. Местные черты развития апвеллинга в прибрежных и открытых районах океана активно изучались вначале аналитически, а затем и с использованием численных моделей, например в [2–6]. Обзор моделей апвеллинга можно найти в работе ¹⁾ и [1].

При изучении апвеллингов Черного моря необходимо также учитывать сравнительно небольшие размеры и замкнутость моря, в результате чего области холодных вод будут иметь мелкомасштабную пространственную структуру, а сами апвеллинги могут часто возникать в различных частях побережья. Вдольбереговые вариации рельефа дна и большие изгибы береговой линии существенно нарушают двумерность прибрежного апвеллинга.

Изучению апвеллингов в северной части Черного моря посвящен ряд численных экспериментов [7, 8]. Отметим также непосредственные наблюдения и численные расчеты развития апвеллинга у восточного побережья Черного моря – в районе Геленджика [9–13]. Работы последнего времени часто сопровождаются иллюстрациями спутниковых наблюдений апвеллингов, которые особенно хорошо обнаруживаются в теплый период года как области холодных прибрежных вод. Среди них отметим недавнюю работу [14], в которой дан обзор большого числа спутниковых наблюдений апвеллингов.

Спутниковые измерения температуры поверхности моря в настоящее время имеют достаточно высокое пространственное разрешение – менее 1 км. В то же время численные эксперименты по моделированию реальных случаев апвеллинга до недавнего времени в основном сводились к моделированию циркуляции всего Черного моря с грубым пространственным разрешением, либо же циркуляция рассчитывалась в локальной прибрежной модели с большим разрешением, но с грубым заданием гидрометеорологических характеристик на открытых границах расчетной области.

В связи с этим представляет интерес провести совместное численное моделирование развития апвеллинга с повышенным пространственным разрешением, используя в модели реалистичную береговую линию, рельеф дна и граничные условия на поверхности моря. В последнее время широкое применение получила численная модель региональной атмосферной циркуляции *WRF* ²⁾ и модель морской циркуляции *NEMO* ³⁾. Первые результаты использования совместной модели атмосфера – море, основанной на *WRF* и *NEMO*, для изучения реакции Черного моря на квазитропический циклон 2005 г. описаны

¹⁾ Моделирование и прогноз верхних слоев океана / Под ред. Е. Б. Крауса. Ленинград : Гидрометиздат, 1979. 367 с.

²⁾ A description of the advanced research WRF version 3 / W. C. Skamarock [et al.]. Boulder, Colorado, USA : NCAR, 2008. 112 p. (NCAR Technical Note ; NCAR/TN-475+STR). doi:10.5065/D68S4MVH

³⁾ NEMO ocean engine / G. Madec [et al.]. IPSL, 2016. 386 p. (Note du pôle de modélisation IPSL, № 27). URL: <http://www.nemo-ocean.eu/doc/> (date of access: 10.03.2023).

в [15]. В [16] эта совместная модель была использована для исследования характерной реакции верхнего слоя Черного моря на интенсивное ветровое воздействие.

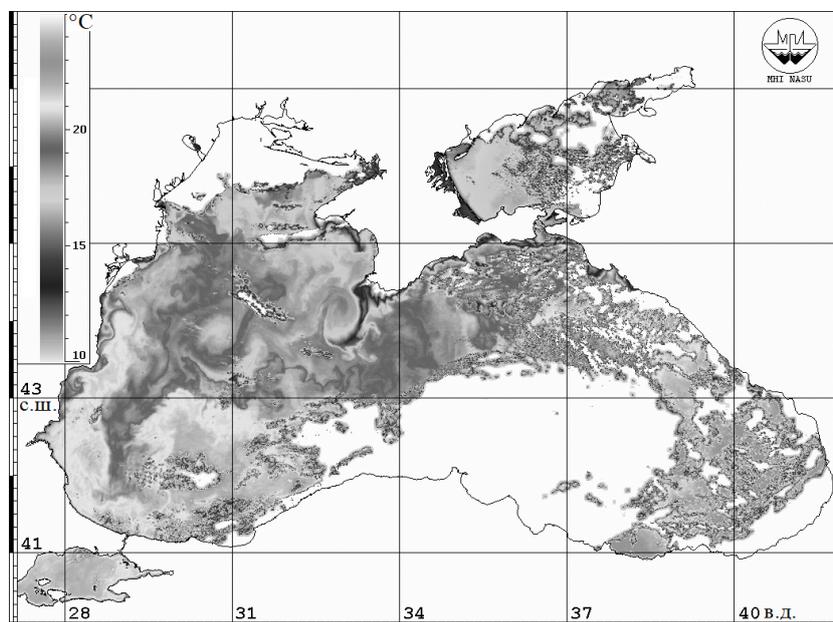
Эта работа посвящена описанию результатов моделирования, проведенного с разрешением 2 км с целью воспроизвести взаимодействие атмосферы и моря во время апвеллинга, возникшего 24–25 сентября 2013 г. в Черном море, в районе ЮБК. Мы не ставили задачу детально рассмотреть все физические механизмы, отвечающие за возникновение апвеллинга в Черном море. В работе численно воспроизведено развитие апвеллинга для одной конкретной синоптической ситуации и выделены мелкомасштабные особенности его структуры.

Численная модель

Совместная модель *NOW (NEMO-OASIS-WRF)* состоит из трех блоков: морской модели *NEMO*, атмосферной модели *WRF* и блока сопряжения *OASIS* [17]. Расчетная область включала в себя все Черное море. Горизонтальные расчетные сетки в морской и атмосферной модели были идентичны, чтобы избежать интерполяции при обмене данными. Пространственное разрешение расчетных сеток составляло 2 км. В атмосферной модели использовалось 37 вертикальных уровней, в морской – 50. Каждые два часа от *NEMO* к *WRF* передаются температура поверхности моря и скорости течения на поверхности, от *WRF* к *NEMO* – радиационные потоки тепла (коротковолновый и длинноволновый), потоки явного и скрытого тепла, напряжение трения ветра, а также разность между испарившейся влагой и выпавшими осадками. Для параметризации атмосферного приповерхностного слоя в *WRF* использовалась схема *Revised MM5 surface layer scheme*, в которой потоки явного и скрытого тепла от поверхности рассчитываются по стандартным балк-формулам. Для параметризации вертикального турбулентного перемешивания в *NEMO* использовалась схема $k-\epsilon$ [18]. Коэффициенты обмена в этой схеме определяются через турбулентную кинетическую энергию и скорость диссипации, которая является прогностической величиной. Результаты модели *NOW* выводились с шагом 1 ч.

Анализ спутниковых снимков ТПМ показал развитие апвеллинга вблизи Крыма 24–25 сентября 2013 г. (рис. 1). Совместное моделирование было начато в 00:00 21 сентября и продолжалось 5 сут. Начальные и боковые граничные условия для атмосферной модели были взяты из реанализа *ERA5* с разрешением 0.25° . Начальные условия для морской модели (поля скорости, температуры, солёности и уровня моря), а также рельеф дна были взяты из глобального реанализа *Copernicus*⁴⁾ с разрешением $1/12^\circ$. Вообще говоря, для более точного воспроизведения аномалий ТПМ необходима предварительная адаптация морской и атмосферной моделей в течение достаточно длительного промежутка времени. Но, поскольку для получения реанализа *Copernicus* в качестве атмосферного форсинга используются данные реанализа *ERA5*, начальные условия для морской модели уже в значительной степени

⁴⁾ URL: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/INFORMATION (дата обращения: 03.02.2023).



Р и с . 1 . Спутниковый снимок температуры поверхности моря за 25 сентября 2013 г. (URL: <http://dvs.net.ru/mp/data/1309/3SEP2504.GIF>)

F i g . 1 . A satellite image of the sea surface temperature for 25 September 2013 (Available at: <http://dvs.net.ru/mp/data/1309/3SEP2504.GIF>)

адаптированы к атмосферным полям из модели *WRF*, что позволяет сократить время адаптационного расчета. По существу, нашей задачей было восстановление более детальной пространственной структуры ветрового апвеллинга в прибрежной области Крыма, не воспроизведенной в исходных полях реанализа с более грубым разрешением. Из-за вычислительных ограничений мы не использовали ансамблевый метод прогноза и остановились лишь на одном варианте траектории развития процесса, учитывая, что определяющими являются граничные условия: рельеф, тип подстилающей поверхности, очертания берега и т. д.

Развитие апвеллинга

На рис. 2 показаны изменения рассчитанных в модели ТПМ, зональной (вдольбереговой) скорости ветра на высоте 10 м и температуры воздуха на высоте 2 м в прибрежной точке 1 с координатами 34.15° в. д., 44.4° с. ш. Эта точка будет в дальнейшем рассматриваться как характерная для прибрежной относительно узкой области моря в районе ЮБК, где изобата 100 м начинается на расстоянии около 10 км, 200 м – на расстоянии 20 км, а 1000 м – на расстоянии 30 км от берега. Как видно из рис. 2, небольшое понижение ТПМ в первые двое суток сменилось резким понижением на $\sim 10^\circ\text{C}$, связанным с повышением приповерхностной скорости ветра и понижением температуры приповерхностного воздуха. Таким образом, на рис. 2 хорошо представлен эпизод резкого локального развития ветрового прибрежного апвеллинга у ЮБК 24–25 сентября, показанный на спутниковом снимке (см. рис.1).

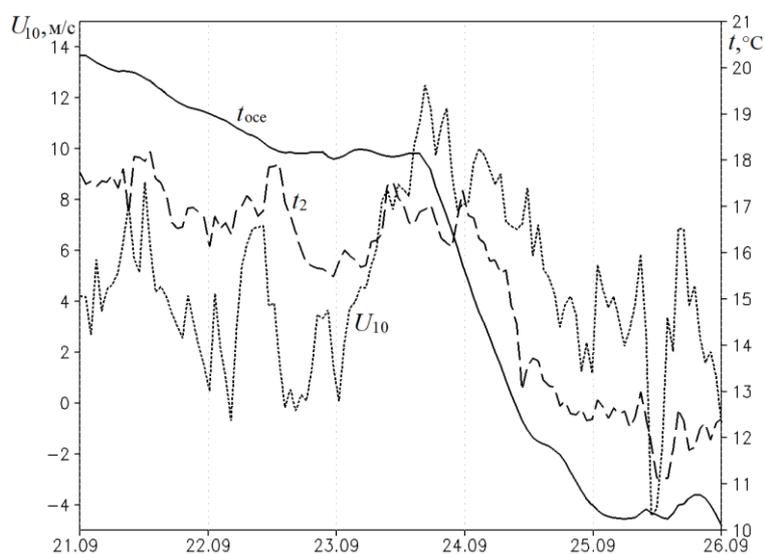


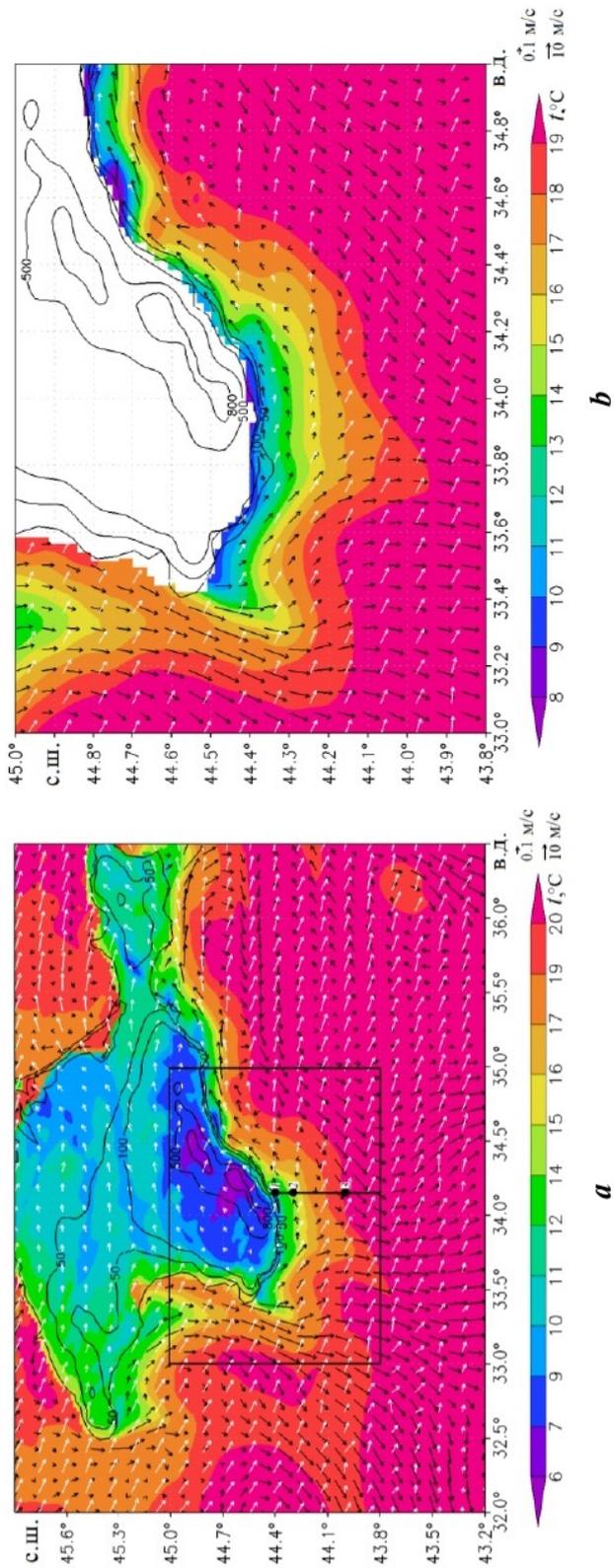
Рис. 2. Зональная (вдольбереговая) скорость ветра на высоте 10 м, U_{10} , приповерхностная температура воздуха на высоте 2 м, t_2 , и температура поверхности моря, t_{0ce} , в прибрежной области в точке I

Fig. 2. Zonal (alongshore) wind speed at a height of 10 m, U_{10} , surface air temperature at a height of 2 m, t_2 , and sea surface temperature t_{0ce} , in the coastal area at point I

Горизонтальная структура апвеллинга

Распределение ТПМ на спутниковом снимке (см. рис. 1) относится к максимально развитому апвеллингу. Примерно для этого же времени на рис. 3, *a* показаны полученные в результате моделирования поля скорости ветра на высоте 10 м и скорости течения на поверхности, а также поля температуры воздуха на высоте 2 м и ТПМ. Эти же поля показаны в увеличенном масштабе с большей детализацией на рис. 3, *b*. Отметим, что данные на рис. 3 относятся к ночному времени суток, для которого характерны низкие значения температуры над сушей.

Как видно из рис. 3, ветровой апвеллинг с минимальными температурами $\sim 11\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$ занимает сравнительно узкую прибрежную зону; ширина области апвеллинга вблизи ЮБК $\sim 30\text{--}50$ км. При этом прибрежный апвеллинг имеет мелкомасштабную пространственную структуру, отражающую изгибы береговой линии и пространственные вариации направления ветра по отношению к берегу. Повышенное разрешение атмосферной модели позволило выделить мелкомасштабные неоднородности поля скорости ветра, определяемые очертаниями берега и рельефа, и, как следствие, локальную структуру апвеллинга. В частности, выделяются мелкомасштабные области понижения температуры там, где ветер направлен вправо вдоль берега, например четко выделяется вдольбереговое направление ветра над морем вблизи гор ЮБК. В то же время там, где прибрежный ветер имеет другое направление, апвеллинг отсутствует, например в северо-западной части Каркинитского залива, на побережье севернее Севастополя, а также на азовском побережье.



Р и с . 3 . Температура поверхности моря и температура воздуха над сушей на высоте 2 м, векторы приводной скорости ветра на высоте 10 м (белый цвет) и скорости течения на поверхности моря (черный цвет) для развитого апвеллинга в 23:00 24 сентября (черный отрезок – разрез; цифрами обозначены временные точки, для которых построены временные ряды на рис. 2 и вертикальные профили на рис. 4) (а); увеличенное изображение выделенной области (температура воздуха над сушей не показана) (б). Изолиниями показана высота рельефа (м)

Fig. 3. Sea surface temperature and air temperature overland at a height of 2 m, vectors of near-water wind speed at a height of 10 m (white colour), and sea surface current velocities (black colour) for a mature upwelling event at 11:00 p.m. on 24 September – the cross-section; numbers denote the points for which time series are built in Fig. 2 and vertical profiles in Fig. 4) (a); enlarged view of the selected area (overland air temperature is not shown) (b). The isolines show the terrain height (m)

Для области ЮБК характерно чередование локальных зон сильного и слабого апвеллинга (рис. 3). Не вдаваясь в детали, отметим, что такие зоны усиления апвеллинга (филаменты) связаны с резкими локальными изменениями очертаний берега в виде мысов [2].

На рис. 3 можно также увидеть, что в открытом море приповерхностная скорость течения в целом направлена по нормали к приводному ветру, а вблизи, например, западного побережья Крыма это простое поведение нарушается из-за особенностей очертаний берега.

Вертикальная структура апвеллинга

Численное моделирование дает возможность детально рассмотреть вертикальную структуру полей скорости и температуры в апвеллинге. На рис. 4, на разрезе, проведенном вдоль 34.15° в. д., показаны температура моря и векторы скорости течения ($V_{\text{осе}}$; $W_{\text{осе}} \cdot 10^3$), где $V_{\text{осе}}$, $W_{\text{осе}}$ – меридиональная и вертикальная компоненты соответственно. Хорошо видна область холодного апвеллинга с пониженной температурой моря и уменьшенной глубиной залегания верхнего квазиоднородного слоя, распространяющаяся от берега на ~ 30 км. Минимальная температура вблизи берега составляет около 11°C . Отметим, что узкая прибрежная область малых (< 60 м) глубин здесь имеет ширину меньше шага расчетной сетки (2 км) и поэтому на рисунке не представлена.

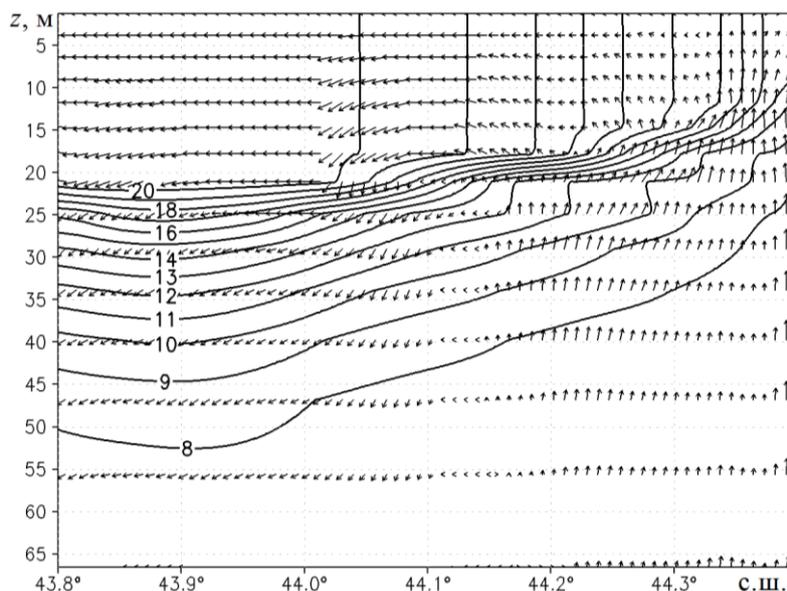


Рис. 4. Температура моря и векторы скорости течения ($V_{\text{осе}}$, $W_{\text{осе}} \cdot 10^3$), где $V_{\text{осе}}$ и $W_{\text{осе}}$ – меридиональная и вертикальная компоненты скорости, на разрезе, проведенном вдоль 34.15° в. д., для развитого апвеллинга в 18:00 24 сентября

Fig. 4. Sea temperature and current velocity vectors ($V_{\text{осе}}$, $W_{\text{осе}} \cdot 10^3$), where $V_{\text{осе}}$ and $W_{\text{осе}} \cdot 10^3$ are meridional and vertical velocity components, at the cross-section at 34.15° E for a mature upwelling event at 6 p.m. on 24 September

Таким образом, численное моделирование позволило выделить еще одну особенность ветрового апвеллинга – развитие вертикальной ячейки циркуляции: подъем воды в прибрежной зоне, отток в верхнем квазиоднородном слое и далее опускание на расстоянии 30–50 км от берега. Эта область опускания воды хорошо видна по векторам скорости на рис. 4.

На рис. 5 приведены вертикальные профили меридиональной скорости, $V_{\text{осе}}$, и температуры моря, $t_{\text{осе}}$, в двух точках разреза, показанного на рис. 3, а, – в точке 2 (34.15° в. д., 44.3° с. ш.) и 3 (34.15° в. д., 44° с. ш.). Виден скачок скорости в области термоклина, свидетельствующий о различных механизмах формирования полей скорости выше и ниже сезонного термоклина: в области верхнего квазиоднородного слоя течение представляет собой отток холодной воды, формирующий апвеллинг за счет подъема ее у берега из области термоклина, в области ниже термоклина профиль скорости отражает фоновую геострофическую циркуляцию, не связанную непосредственно с апвеллингом. Интересно отметить, что температура в верхнем квазиоднородном слое постоянна, а профиль скорости наклонный. Последнее является следствием параметризации вертикального перемешивания в модели *NEMO*: поверхностная сила трения ветра вызывает в нижележащем квазиоднородном по температуре слое линейное затухание скорости. При этом выполняются условия формирования верхнего квазиоднородного профиля температуры.

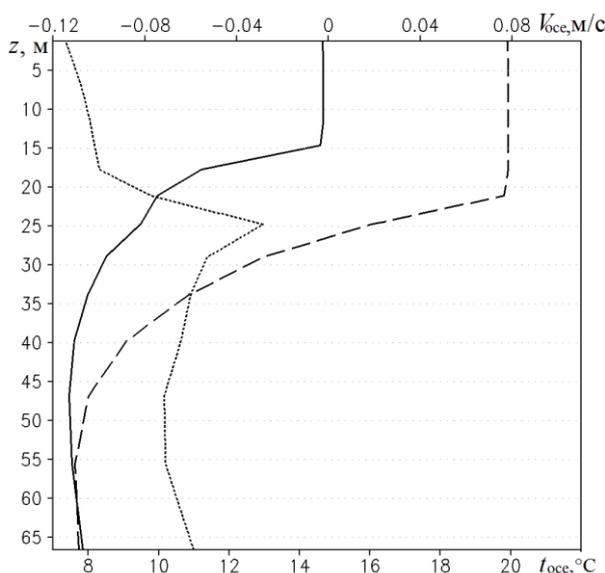


Рис. 5. Вертикальные профили температуры воды, $t_{\text{осе}}$, в точках 2 (сплошная линия) и 3 (штриховая линия), а также профиль меридиональной скорости, $V_{\text{осе}}$, в точке 3 (пунктирная линия) в 03:00 25 сентября

Fig. 5. Vertical profiles of water temperature, $t_{\text{осе}}$, at points 2 (solid line) and 3 (dashed line) as well as meridional velocity profile, $V_{\text{осе}}$, at point 3 (dotted line) at 3 a.m. on 25 September

На рис. 6 показаны компоненты скорости и температура в верхнем слое моря вдоль разреза по 34.15° в. д., продленного до 42.6° с. ш. Правая (северная) часть рис. 6 относится к апвеллингу, а в левой (южной) части для сравнения показаны фоновые поля, не связанные с апвеллингом. Значение зональной (вдольбереговой) компоненты скорости приповерхностного течения изменяется от небольших положительных значений ~ 0.1 м/с вблизи берега до отрицательных ~ -0.15 м/с в открытом море. Интересно рассмотреть поведение меридиональной компоненты скорости, нормальной по отношению к береговой линии. Как и следовало ожидать из общих соображений, скорость этого нормального к берегу течения, направленного в сторону открытого моря, максимальна на некотором расстоянии от берега (рис. 6). Она достигает значения ~ 0.2 м/с. Как видно из рис. 6, область пониженных ($< 20^\circ\text{C}$) значений температуры приповерхностного слоя моря относительно невелика и распространяется от берега на расстояние 50–60 км. При этом область, где проявляются возмущения полей скорости, прослеживается и на большем удалении от берега.

Это можно увидеть на рис. 7, на котором показано, как изменялись во времени меридиональная (направленная по нормали к берегу) и зональная (вдольбереговая) скорости течения на верхнем уровне модели вдоль того же разреза, что и на рис. 6. Хорошо видна область направленных от берега течений со скоростями, достигающими ~ 0.2 – 0.25 м/с на расстоянии 40–60 км,

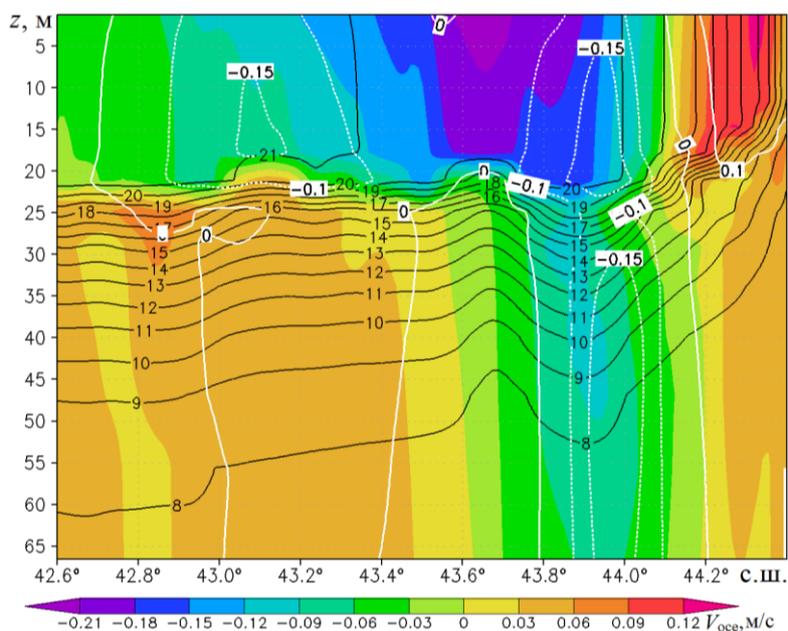
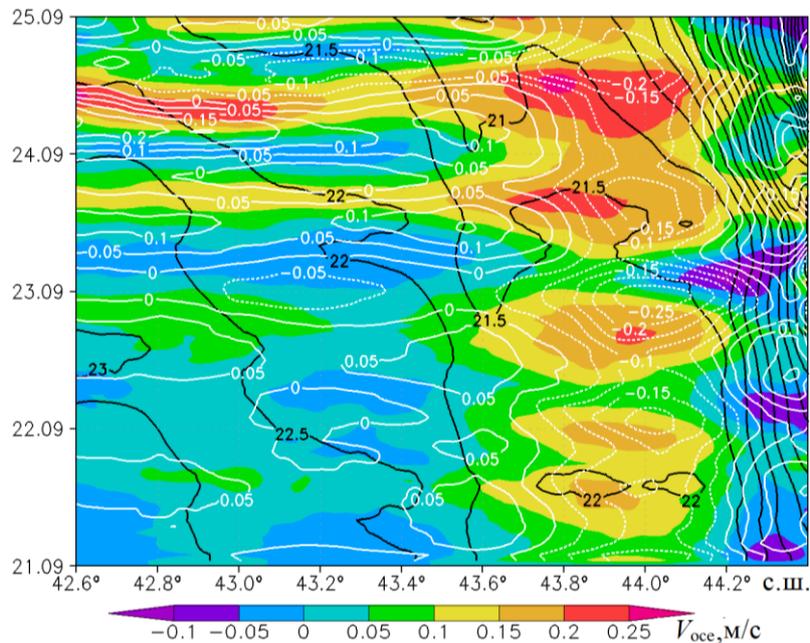


Рис. 6. Меридиональная скорость, температура воды (черные изолинии) и зональная скорость (белые изолинии) вдоль разреза по 34.15° в. д. в 3:00 25 сентября

Fig. 6. Meridional velocity, water temperature (black isolines), and zonal velocity (white isolines) along the cross-section at 34.15° E at 3 a.m. on 25 September



Р и с . 7. Изменение во времени меридиональной (цвет) и зональной (белые изолинии) скорости течения, а также температуры моря (черные изолинии) на верхнем уровне модели (1.25 м) вдоль разреза по 34.15° в. д. Для наглядности меридиональная скорость показана с противоположным знаком

Fig. 7. Time variation of the meridional (colour) and zonal (white isolines) current velocities as well as that of sea temperature (black isolines) at the upper level of the model (1.25 m) along the cross-section at 34.15° E. For illustrative purposes, the meridional velocity is shown opposite in sign

а также область направленных к берегу течений с меньшими скоростями ~ 0.1 м/с на расстоянии 20–30 км. Видна суточная периодичность приповерхностных течений. Максимальная скорость, направленная от берега, приходится на дневные часы (12–14 ч), что соответствует времени максимального суточного прогрева воздуха и суточному ходу прибрежной скорости ветра. Вдольбереговая компонента скорости также испытывает периодические суточные колебания с запаздыванием по времени на 4–6 ч по отношению к нормальной компоненте. Можно с уверенностью полагать, что эти прибрежные периодические изменения скорости и температуры воды возбуждаются бризовой циркуляцией, развивающейся в теплый период года в области ЮБК [19]. Мы не будем рассматривать физические механизмы взаимодействия этих двух мезомасштабных процессов – это требует повышения пространственного разрешения численных моделей.

Заключение

При помощи совместной численной модели с разрешением 2 км, включающей атмосферную модель *WRF* и морскую *NEMO*, воспроизведена реакция верхнего слоя Черного моря на усиление скорости ветра в прибрежной области ЮБК. Численная оценка понижения ТПМ вблизи берега на ~ 10 °С, вызванного холодным апвеллингом, согласуется с данными спутниковых измерений.

Получена пространственная структура полей приповерхностной скорости ветра и температуры воздуха, а также скорости течения и температуры моря. Повышенное пространственное разрешение в атмосферной и морской модели позволило выделить мелкомасштабные неоднородности, связанные с неоднородностями берега и прибрежного рельефа, не разрешаемые во входных данных реанализа. Область прибрежного апвеллинга имеет существенно неоднородную вдольбереговую пространственную структуру: в восточной, северо-восточной и северо-западной частях крымского побережья апвеллинг отсутствует.

Рассмотрены особенности изменения меридиональной (нормальной к берегу) и зональной (вдольбереговой) компонент скорости течения в апвеллинге. Показано развитие вдольберегового течения, а также течения, направленного в сторону моря. Последнее является частью вертикальной ячейки апвеллинговой циркуляции: подъем холодных вод вблизи берега, распространение в сторону моря и далее опускание. Горизонтальные скорости течения в этой ячейке вблизи поверхности составляют 0.1–0.2 м/с, вертикальные скорости подъема вод в прибрежной области составляют около 10^{-4} – 10^{-3} м/с. Непосредственно вблизи берега обнаруживаются колебания скорости с суточным периодом, связанные с влиянием бризовой циркуляции.

Анализ результатов совместного моделирования показал, что модель *NOW* способна правильно воспроизводить такие мелкомасштабные явления, как ветровой апвеллинг вблизи крымского побережья, и может быть использована для численного исследования процессов в верхнем слое моря с высоким пространственным разрешением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В. А., Михайлова Э. Н. Апвеллинг в Черном море. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 92 с.
2. Brink K. N. The near-surface dynamics of coastal upwelling // *Progress in Oceanography*. 1983. Vol. 12, iss. 3. P. 223–257. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(83\)90009-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(83)90009-5)
3. Allen J. S. Upwelling and coastal jets in a continuously stratified ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 1973. Vol. 3, iss. 3. P. 245–257. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1973\)003<0245:UACJIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1973)003<0245:UACJIA>2.0.CO;2)
4. Preller R., O'Brien J. J. The influence of bottom topography on upwelling off Peru // *Journal of Physical Oceanography*. 1980. Vol. 10, iss. 9. P. 1377–1398. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<1377:TIOBTO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<1377:TIOBTO>2.0.CO;2)
5. Philander S. J. H., Yoon J.-H. Eastern boundary currents and coastal upwelling // *Journal of Physical Oceanography*. 1982. Vol. 12, iss. 8. P. 862–879. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012<0862:EVCACU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012<0862:EVCACU>2.0.CO;2)

6. *Peffley M. B., O'Brien J. J.* A Three-dimensional simulation of coastal upwelling off Oregon // *Journal of Physical Oceanography*. 1976. Vol. 6, iss. 2. P. 164–180. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1976\)006<0164:ATDSOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1976)006<0164:ATDSOC>2.0.CO;2)
7. *Андросович А. И., Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Численная модель и расчеты циркуляции вод северо-западной части Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 1994. № 5. С. 28–42.
8. *Коснырев В. К., Михайлова Э. Н., Станичный С. В.* Апвеллинг в Черном море по результатам численных экспериментов и спутниковым данным // *Морской гидрофизический журнал*. 1996. № 5. С. 34–46.
9. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море / А. Г. Зацепин [и др.] // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 2. С. 203–214. EDN VRYSTZ. doi:10.7868/S0030157416020222
10. *Гинзбург А. И.* О нестационарных струйных течениях в юго-западной части Черного моря // *Исследования Земли из космоса*. 1995. № 4. С. 10–16.
11. Циклонические вихри апвеллингового происхождения у юго-западной оконечности Крыма / А. И. Гинзбург [и др.] // *Исследования Земли из космоса*. 1998. № 3. С. 83–88.
12. *Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Зацепин А. Г.* Численное моделирование события полного апвеллинга в северо-восточной части Черного моря на гидрофизическом полигоне ИО РАН // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 5. С. 683–689. <https://doi.org/10.7868/S0030157417050021>
13. *Полонский А. Б., Музылева М. А.* Современная пространственно-временная изменчивость апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2016. № 4. С. 96–108. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-4-96-108>
14. *Станичная Р. Р., Станичный С. В.* Апвеллинги Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 4. С. 195–207. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207
15. Реакция верхнего слоя Черного моря на прохождение циклона 25–29 сентября 2005 г. / Д. А. Яровая [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 10. С. 38–52. EDN CTZUFK.
16. *Яровая Д. А., Ефимов В. В.* Развитие холодной аномалии температуры поверхности Черного моря // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57, № 4. С. 471–483. EDN YAJJOC. doi:10.31857/S0002351521040118
17. *Valcke S.* The OASIS3 coupler: A European climate modelling community software // *Geoscientific Model Development*. 2013. Vol. 6, iss. 2. P. 373–388. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-373-2013>
18. *Rodi W.* Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1987. Vol. 92, iss. C5. P. 5305–5328. <https://doi.org/10.1029/JC092iC05p05305>
19. *Ефимов В. В.* Численное моделирование бризовой циркуляции над Крымским полуостровом // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 1. С. 95–106. EDN YIUXVD. doi:10.7868/S0002351517010047

Поступила 14.11.2022 г.; одобрена после рецензирования 23.01.2023 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Сведения об авторах:

Яровая Дарья Александровна, старший научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: Q-4144-2016, ORCID ID: 0000-0003-0949-2040, Scopus Author ID: 57205741734, darik777@mhi-ras.ru**

Ефимов Владимир Васильевич, заведующий отделом взаимодействия атмосферы и океана, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: P-2063-2017, Scopus Author ID: 6602381894, vefim38@mail.ru**

Барабанов Владислав Сергеевич, старший научный сотрудник, отдела взаимодействия атмосферы и океана, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: C-6007-2013, Scopus Author ID: 7006247713, wbarbs@gmail.com**

Вклад авторов:

Яровая Дарья Александровна – численное моделирование, обработка и интерпретация результатов моделирования, подготовка рисунков

Ефимов Владимир Васильевич – формулирование задачи, участие в обсуждении результатов, критический анализ статьи

Барабанов Владислав Сергеевич – участие в обсуждении результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.