

# Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.465

Э.Н. Михайлова\*, А.Б. Полонский\*, М.А. Музылёва\*\*

## О причинах понижения температуры поверхности воды в Каркинитском заливе Черного моря

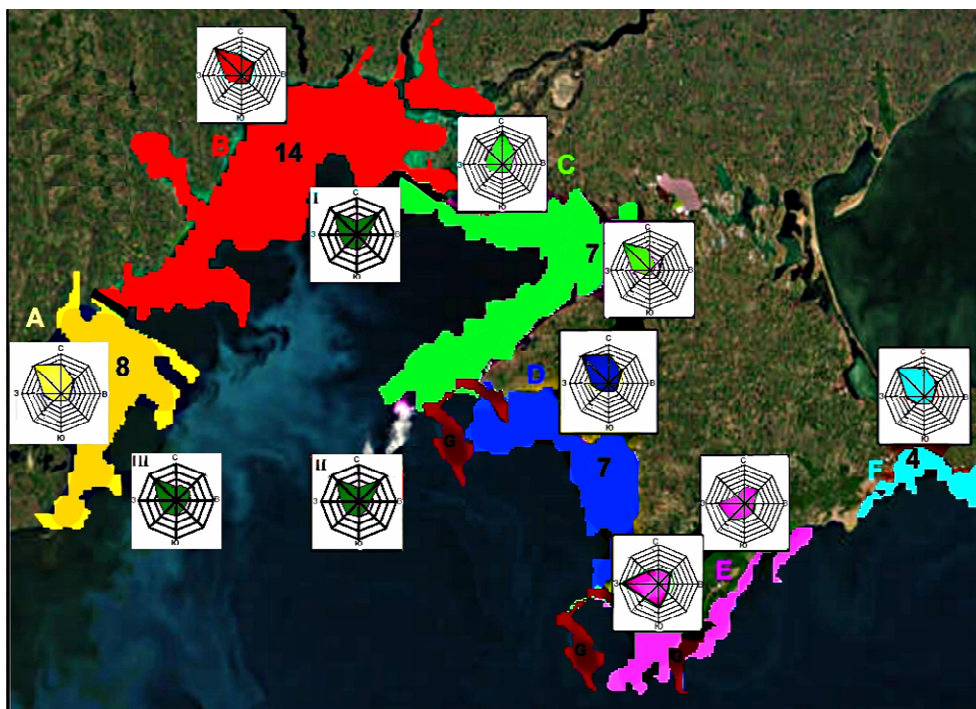
Рассмотрены причины понижения температуры поверхности воды в северо-западной части Черного моря на основе анализа спутниковых данных и результатов численного моделирования. Использованы спутниковые данные (NOAA-15/17) с разрешением 1 км за май – октябрь 2005 – 2008 гг., данные реанализа и трехмерная численная модель. По данным наблюдений выявлена зона пониженной поверхностной температуры в Каркинитском заливе, распространяющаяся при устойчивом северо-западном ветре. Для определения причин понижения температуры поверхности моря в Каркинитском заливе проведен специальный численный эксперимент. Анализ баланса слагаемых в уравнении теплопроводности для верхнего перемешанного слоя показал, что если в северной части Каркинитского залива при северо-западном ветре изменение температуры верхнего слоя моря действительно определяется вертикальными восходящими движениями вод (т.е. апвеллингом), то причиной появления холодных вод в южной части залива при таком ветре является горизонтальная адвекция.

**Ключевые слова:** апвеллинг, северо-западная часть Черного моря, Каркинитский залив.

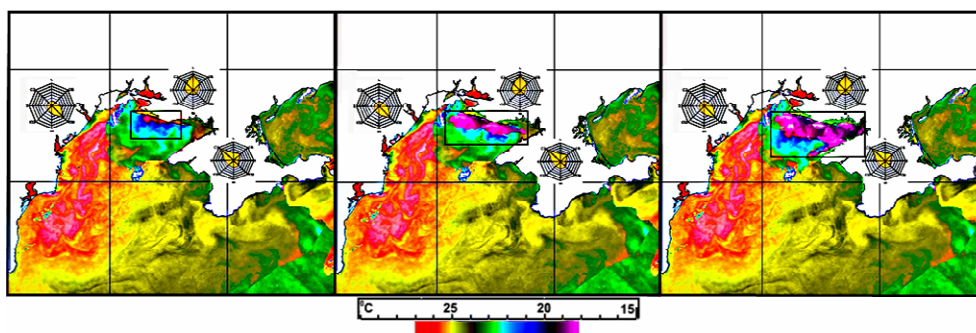
**Введение.** Хорошо известно, что в теплый период года при определенных гидрометеорологических условиях в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма наблюдается понижение температуры поверхности моря (ТПМ). Считается, что главной причиной этого является апвеллинг, который бывает сгонным, экмановским и смешанным в зависимости от глубины прибрежных частей моря [1, 2]. В работе [3] проведена типизация зон пониженной ТПМ в северной части Черного моря. На основе анализа спутниковых данных на рис. 1 представлены 7 зон, которые характеризовались спецификой пространственно-временной изменчивости ТПМ. В большинстве случаев понижение температуры (интерпретируемое чаще всего как проявление апвеллинга) возникало в каждой из выделенных зон независимо друг от друга при определенных ветровых условиях. Цифры, изображенные внутри каждой из зон, обозначают количество зафиксированных там апвеллингов. В исследуемый период наибольшее количество апвеллингов наблюдалось в зоне В (14 случаев), а наименьшее – в зонах F и G (по 4 случая соответственно). Вместе с тем было показано, что иногда пониженная ТПМ наблюдается при отсутствии сгонного ветра. Например, был описан случай одновременного проявления апвеллинга во всех выделенных зонах. При этом по данным реанализа

© Э.Н. Михайлова\*, А.Б. Полонский\*, М.А. Музылёва\*\*, 2011

нализа ветер был северо-западным, т.е. он являлся сгонным только для некоторых частей прибрежной зоны: от границы с Румынией до о. Долгий (зоны А и В), северной части Каламитского залива (зона D), от м. Меганом до Керченского пролива (зона F). В зонах С, Е, G апвеллинг наблюдался при отсутствии сгонного ветра. Так, например, в зоне G проявлялся апвеллинг, связанный с динамикой струи Основного Черноморского течения, а в зоне С (рис. 2) сгонный ветер наблюдался только вдоль северного побережья Каркинитского залива. При этом пониженная ТПМ наблюдалась во всей зоне С.



**Р и с. 1.** Преобладающие направления ветров в период понижения ТПМ в 7 выделенных зонах Черного моря по данным реанализа (I, II, III) и спутниковым наблюдениям за май – октябрь 2005 – 2008 гг. [3]



**Р и с. 2.** ТПМ (°С) на основе спутниковых данных с учетом розы ветров для периода апвеллинга в структурной зоне С (обозначена прямоугольником) 8 – 10 августа 2007 г. [4]

На основе анализа спутниковых данных и предварительных результатов моделирования в работе [4] было высказано предположение о том, что понижение ТПМ в южной части Каркинитского залива при северо-западном ветре связано с горизонтальной адвекцией холодных вод, распространяющихся из его северной части.

В настоящей работе вывод об адвективном характере понижения ТПМ в южной части Каркинитского залива будет подтвержден путем анализа баланса слагаемых в уравнении теплопроводности для верхнего перемешанного слоя на основе данных численного эксперимента с применением модели из работы [5].

#### **Характеристика модели и проведенного численного эксперимента.**

Используется численная многоуровневая модель, основанная на примитивных уравнениях гидродинамики океана. Уравнения аппроксимируются на сетке  $B$  (см. работу [1]). Вся северо-западная часть Черного моря разбивается на боксы, размеры которых по горизонтали составляют  $2,5'$  (3,36 км) вдоль параллели и  $1,25'$  (2,31 км) вдоль меридиана. Максимальное число уровней в модели по вертикали – 11, причем горизонтальные составляющие скорости течения, температура и соленость рассчитываются для горизонтов: 0,5; 1,5; 6,5; 13,5; 26,5; 43,5; 76,5. Толщина нижних боксов равняется разности между реальной глубиной моря  $H(x, y)$  и глубиной залегания нижней границы предпоследнего бокса. Минимальная глубина в прибрежной зоне моря задается равной 7 м.

В настоящем варианте модели используется приближение «твердой крышки». Для описания процессов горизонтального обмена взяты бигармонические операторы. На поверхности моря задаются тангенциальное напряжение трения ветра и равные нулю потоки тепла и солей. На жидкой границе, отделяющей северо-западную часть от остального моря, ставятся условия свободного протекания. На дне принимается условие обтекания. На боковых твердых границах задаются условия прилипания, а также дополнительные условия, связанные с введением бигармонического оператора для диссипативного слагаемого (скорость и вторая производная принимаются равными нулю). Рассматривается весь северо-западный шельф с реальной топографией дна и подробной береговой линией с учетом Днепро-Бугского лимана, Кинбурнской косы, Ягорлыцкого и Гендровского заливов, Гендровской и Джагарлычской косы и Джагарлычского залива.

Численный эксперимент проводился следующим образом. В начальный момент времени скорости течения во всей области принимались равными нулю, температура и соленость – горизонтально-однородными и стратифицированными по вертикали. В верхнем 4-метровом слое соленость равнялась 18, на более глубоких горизонтах – 18,5. Температура воды в этом слое задавалась равной  $25^{\circ}\text{C}$ , на горизонтах 6,5 и 13,5 м –  $19$  и  $12^{\circ}\text{C}$ , а глубже –  $8^{\circ}\text{C}$ . На поверхности задавался внезапно возникший северо-западный однородный стационарный ветер (тангенциальное напряжение принималось равным  $4 \text{ см}^2/\text{с}^2$ , что примерно соответствует скорости  $15 \text{ м/с}$ ), поскольку именно такой ветер наблюдался в период, когда устойчивое понижение ТПМ отмеча-

лось во всех выделенных зонах, включая Каркинитский залив. Расчет проводился на срок 2 сут.

Для определения роли различных факторов в понижении температуры на основе результатов численного моделирования рассматривался баланс слагаемых в уравнении температуропроводности для меридионального разреза в Каркинитском заливе (рис. 3). Уравнение записывалось в следующем виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + l \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),$$

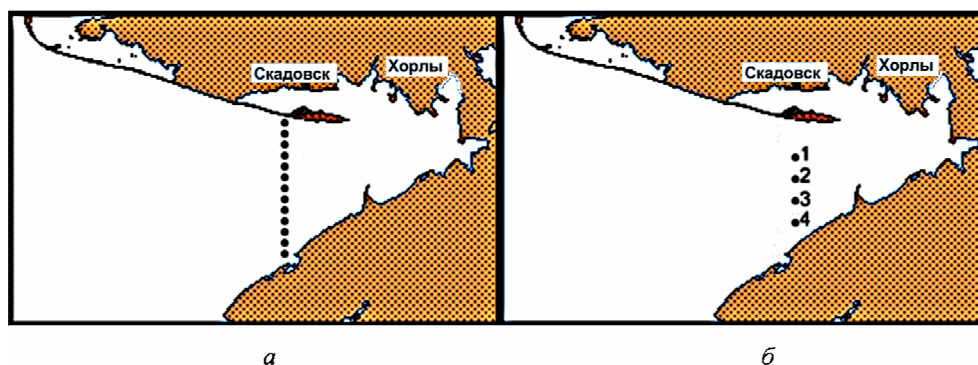
где  $\mu$  – коэффициент вертикального турбулентного обмена теплом,  $l$  – коэффициент горизонтального турбулентного обмена теплом. Остальные обозначения – общепринятые.

Коэффициент  $\mu$  берется зависящим от глубины моря  $H(x, y)$ :

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 (H / H_0), & H \leq H_0, \\ \mu_0, & H \geq H_0, \end{cases}$$

где  $\mu_0 = 100 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $H_0 = 50 \text{ м}$ . Все слагаемые рассчитывались на сетке  $B$  так же, как и в численной модели из работы [1].

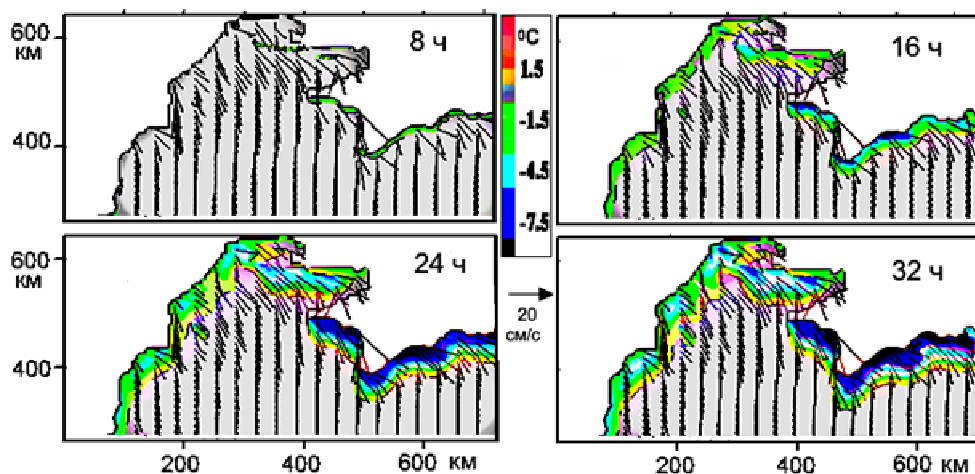
Баланс тепла вычислялся для меридионального разреза, приведенного на рис. 3, а. Расчет был выполнен для всех 13 точек разреза, однако для краткости далее будут приведены результаты для горизонта 0,5 м только для 4 точек, показанных на рис. 3, б.



**Р и с. 3.** Меридиональный разрез в Каркинитском заливе, для точек которого в узлах модельной сетки рассчитывался баланс тепла для слоя 0,5 м: а – 13 точек модельной сетки; б – выбранные 4 точки, для которых на рис. 5 приведен баланс слагаемых в уравнении температуропроводности

**Анализ результатов.** После начала действия северо-западного ветра ТПМ начинает понижаться во всех выделенных зонах. Ясно, что это происходит вследствие развития апвеллинга в той части прибрежной зоны (от границы с Румынией до Керченского пролива), для которой северо-западный

ветер является сгонным. Подчеркнем вместе с тем, что в зоне С области пониженной ТПМ занимают не только северную часть Каркинитского залива, находящуюся под действием сгонного северо-западного ветра, но и южную его часть, для которой ветер этого направления является, наоборот, нагонным. Этот результат полностью соответствует данным наблюдений из работ [3, 4]. Как уже упоминалось, в работе [4] был сделан предварительный вывод о важной роли горизонтальной адвекции холодных вод из зоны прибрежного апвеллинга в эволюции поля ТПМ южной части Каркинитского залива. Этот вывод подтвердился как спутниковыми снимками (рис. 2), так и результатами численного эксперимента (рис. 4, 5).

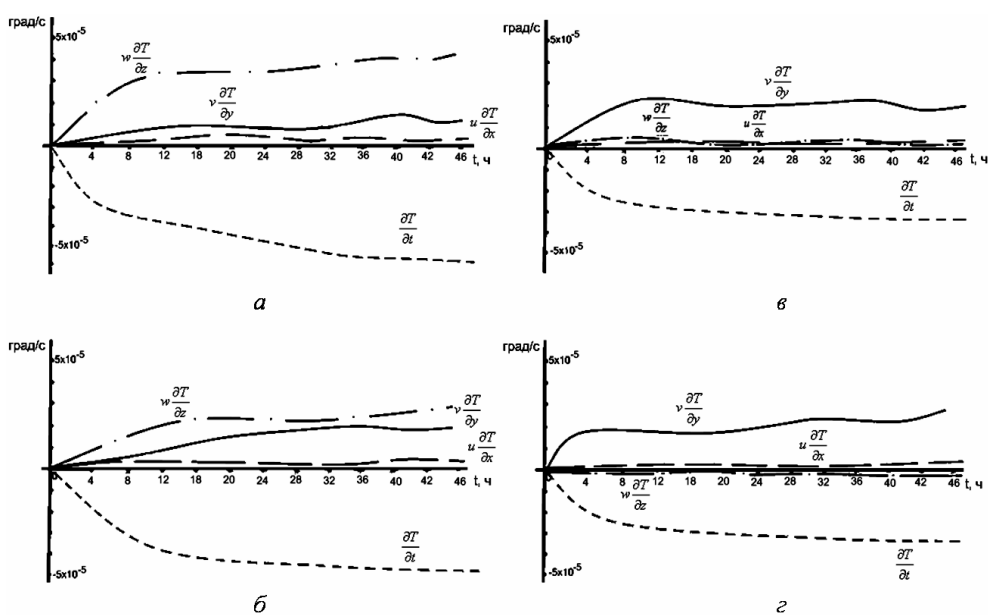


Р и с. 4. Изменение аномалий ТПМ и скорости течения на поверхности моря через 8, 16, 24 и 32 ч после начала действия ветра в численном эксперименте

На рис. 4 показаны аномалии ТПМ (вычислялись как отклонение от средней температуры по расчетной области) через 8, 16, 24 и 32 ч после начала действия ветра. Аномалии ТПМ у побережья Крыма и в северо-западной части Каркинитского залива достигают  $7,5^{\circ}\text{C}$  через 16 – 32 ч после начала действия ветра, а генерируемые ветром скорости течения составляют 20 см/с. Апвеллинг в зоне С развивается вдоль северного побережья Каркинитского залива. На вторые модельные сутки холодная вода за счет горизонтальной адвекции распространяется до его южной части.

Более подробная количественная характеристика процесса адвективного выхолаживания вод приведена на рис. 5, демонстрирующем баланс слагаемых в уравнении температуропроводности для верхнего перемешанного слоя. Хорошо видно, что эволюции ТПМ в северной части Каркинитского залива (рис. 5, а) и в его южной части (рис. 5, б) принципиально отличаются.

В северной части Каркинитского залива (рис. 5, *a*; точка № 1 на разрезе рис. 3, *б*) слагаемое  $\frac{\partial T}{\partial t}$  в основном балансируется слагаемым  $w \frac{\partial T}{\partial z}$ , что свидетельствует о преимущественно апвеллинговом происхождении холодных вод и в целом подтверждает ранее сделанные выводы [4] на основании качественного анализа эволюции ТПМ. Отметим при этом, что горизонтальная адвекция ( $v \frac{\partial T}{\partial y} + u \frac{\partial T}{\partial x}$ ) здесь также вносит определенный вклад в изменение температуры. В отдельные периоды она составляет для точки № 1 до 35 – 40% от вертикальной адвекции.



**Р и с. 5.** Временная изменчивость различных слагаемых уравнения баланса тепла  $u \frac{\partial T}{\partial x}$ ,  $v \frac{\partial T}{\partial y}$ ,  $w \frac{\partial T}{\partial z}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial t}$  для точек меридионального разреза на рис. 3, *б* на горизонте 5 м: *a* – точка № 1, *б* – точка № 2, *в* – точка № 3, *г* – точка № 4

В южной части Каркинитского залива (рис. 5, *г*; точка № 4 на разрезе рис. 3, *б*) понижение ТПМ почти полностью связано с горизонтальной адвекцией в меридиональном направлении (т.е. с  $v \frac{\partial T}{\partial y}$ ). Апвеллинг вообще отсутствует, а наблюдается слабый даунвеллинг, что видно по смене знака члена  $w \frac{\partial T}{\partial z}$ . Таким образом, подтверждается предварительный вывод, сделанный в

работе [4] о том, что наблюдаемое в южной части Каркинитского залива понижение ТПМ связано с горизонтальной адвекцией тепла, причем в основном в меридиональном направлении.

В точке № 2 (рис. 5, б), расположенной в середине Каркинитского залива (разрез на рис. 3, б), через 32 ч после начала действия ветра и развития апвеллинга величины вертикальной ( $w \frac{\partial T}{\partial z}$ ) и горизонтальной ( $v \frac{\partial T}{\partial y} + u \frac{\partial T}{\partial x}$ ) ад-

векции практически одинаковы. В точке № 3 (рис. 5, в), расположенной южнее (разрез на рис. 3, б), вертикальная адвекция еще приводит к выхолаживанию верхнего слоя, однако горизонтальная адвекция, в основном в меридиональном направлении, вносит значительно больший вклад в понижение ТПМ.

Результаты численного эксперимента подтвердили ранее сделанный вывод об адвективном характере понижения ТПМ в южной части Каркинитского залива при северо-западном ветре.

**Выводы.** В результате подробного анализа развития апвеллинга в Каркинитском заливе на основе данных как спутниковых наблюдений, так и численного моделирования были подтверждены результаты работы [4], касающиеся механизма понижения ТПМ при северо-западном устойчивом ветре. Показано, что если в северной части Каркинитского залива при северо-западном ветре изменение температуры верхнего слоя моря действительно определяется вертикальными восходящими движениями вод (т.е. апвеллингом), то причиной появления холодных вод в южной части залива при таком ветре является горизонтальная адвекция тепла. Время растекания холодных вод из зоны апвеллинга по всему Каркинитскому заливу при скорости ветра около 15 м/с составляет порядка 1 сут, а скорость дрейфовых течений в верхнем слое – около 20 см/с. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наблюдаемое при северо-западном ветре в Каркинитском заливе понижение ТПМ связано главным образом с двумя физическими механизмами: сгонным апвеллингом в северной части залива и горизонтальной адвекцией холодных вод – в южной.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архипкин В.С., Еремеев В.Н., Иванов В.А.* Апвеллинг в пограничных областях океана. – Севастополь, 1987. – 46 с. – (Препринт / НАН Украины. МГИ).
2. *Иванов В.А., Михайлова Э.Н.* Апвеллинг в Черном море. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2008. – 92 с.
3. *Михайлова Э.Н., Музылёва М.А., Полонский А.Б. и др.* Пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма в 2005 – 2008 гг. // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – С. 98 – 105.

4. Михайлова Э.Н., Музылёва М.А., Полонский А.Б. Пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма в 2005 – 2008 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 2(7). – С. 46 – 51.
5. Андросович А.И., Михайлова Э.Н., Шатира Н.Б. Численная модель и расчеты циркуляции вод северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – № 5. – С. 28 – 42.

\*Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 02.09.10

\*\*Филиал Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова в г. Севастополе  
E-mail: marina-muz@mail.ru,  
apolonsky5@mail.ru

После доработки 29.11.10

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто причини зниження температури поверхні води в північно-західній частині Чорного моря на основі аналізу супутникових даних і результатів чисельного моделювання. Використані супутникові дані (NOAA-15/17) з роздільною просторовою здатністю 1 км за травень – жовтень 2005 – 2008 рр., дані реаналізу та тривимірна чисельна модель. За даними спостережень виявлена зона зниженої поверхневої температури в Каркінитській затоці, яка розповсюджується при стійкому північно-західному вітрі. Для визначення причин зниження температури поверхні моря в Каркінитській затоці проведено спеціальний чисельний експеримент. Аналіз балансу складових у рівнянні теплопроводності для верхнього перемішаного шару показав, що якщо в північній частині Каркінитської затоки при північно-західному вітрі зміна температури верхнього шару моря дійсно визначається вертикальними висхідними рухами вод (тобто апвелінгом), то причиною появи холодних вод в південній частині затоки при такому вітрі є горизонтальна адвекція.

**Ключові слова:** апвелінг, північно-західна частина Чорного моря, Каркінитська затока.

**ABSTRACT** Causes of water temperature decrease in the northwestern Black Sea are considered based on analysis of satellite data and numerical simulation results. Satellite data (NOAA-15/17) with 1 km resolution for May – October, 2005 – 2008, reanalysis data and three-dimensional numerical model are used. The observation data permit to reveal the zone of the decreased surface temperature in the Karkinitzky bay propagating at stable northwestern wind. To reveal the reasons of the sea surface temperature decrease in the Karkinitzky bay, special numerical experiment is performed. Analysis of components' balance in the diffusivity equation for the upper mixed layer shows that, in case in the northern part of the Karkinitzky bay at the northwestern wind variation of the upper sea layer temperature is actually governed by vertical ascending water motions, i.e. upwelling, the reason of cold water appearance in the southern part of the bay at such a wind is horizontal advection.

**Keywords:** upwelling, northwestern part of the Black Sea, Karkinitzky bay.