

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.465.4 (262.5)

DOI: 10.22449/0233-7584-2018-5-399-411

Апвеллинг у берегов Западного Крыма

Ю. Н. Горячкин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

E-mail: yngor@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.03.2018 г., после доработки 18.04.2018 г.

В связи с проблемой самоочищения морских вод рассмотрено явление апвеллинга у берегов Западного Крыма. Анализировались данные наблюдений над ветром и температурой воды на морских гидрометеорологических станциях Евпатория и Черноморское, а также данные спутниковых наблюдений за температурой поверхности моря NOAA-15/19 и MetOp-2. В период 1921–2011 гг. выделено 212 случаев апвеллинга, наибольшее количество приходится на июль. В подавляющем большинстве случаев продолжительность апвеллинга варьировала в пределах от 2 до 15 сут, только в 20% случаев она составляла от 16 до 30 сут. Средняя скорость изменения температуры в 75% наблюдаемых случаев не превышала 0,1 °C/ч. Аномалии, превышающие 7 °C, наблюдались в 18% случаев, из них стоит особенно выделить редкие понижения температуры более чем на 11 °C (июль 1954 и 1996 гг., август 2000 г.). В многолетней изменчивости количества случаев какой-либо выраженной периодичности и многолетней тенденции к уменьшению или увеличению не отмечалось. Показано, что явление апвеллинга в Каламитском заливе определяется не только экмановским механизмом, возникающим при действии вдольберегового ветра, но и сгонным эффектом, вызванным сильным ветром с берега.

Ключевые слова: Черное море, Западный Крым, Каламитский залив, апвеллинг, температура воды, спутниковые данные.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0004.

Для цитирования: Горячкин Ю. Н. Апвеллинг у берегов Западного Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 5. С. 399-411. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-399-411

Upwelling nearby the Crimea Western Coast

Yu. N. Goryachkin

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

e-mail: yngor@yandex.ru

In connection with the problem of the seawater self-purification, considered is the upwelling phenomenon nearby the Crimea western coast. The observation data on wind and water temperature obtained at the Yevpatoria and Chernomorskoe weather stations as well as the sea surface temperature data derived by the satellites NOAA-15/19 and MetOp-2 were analyzed. 212 cases of upwelling are identified for the period from 1921 to 2011; most of them fall on July. In the majority of cases, the upwelling duration varied within 2–15 days, but in 20% of all the cases it lasted 16–30 days. On the average the duration comprised 11.8 days. The average rate of temperature change in 75% of the observed cases did not exceed 0.1 °C/h. The anomalies exceeding 7 °C/h were observed in 18% of the cases; among them there are a few ones worthy of being noted when the temperature dropped by more than 11 °C (July, 1954 and 1996, and August, 2000). The available multi-year data on upwelling variability demonstrate neither expressed periodicity of the phenomenon nor long-term tendency to its decrease or increase. It is shown that the upwelling phenomenon in the Kalamitsky Bay is determined not only by the Ekman mechanism arising under the influence of the along-coastal wind, but also by the offshore wind effect resulting from the tangential wind stress.

Keywords: Black Sea, Western Crimea, Kalamitsky Bay, upwelling, water temperature, satellite data.

Acknowledgements: the investigation is carried out within the framework of the state task on the theme № 0827-2018-0004.

For citation: Goryachkin, Yu.N., 2018. Upwelling nearby the Crimea Western Coast. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(5), pp. 399-411. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-399-411 (in Russian).

© Горячкин Ю. Н., 2018

Введение. В настоящее время существует ряд проектов строительства в береговой зоне Каламитского залива Черного моря (Западный Крым) берегозащитных сооружений, яхтенных марин и других объектов. Одним из важных требований, которые должны выдвигаться к решениям при проектировании, является сохранение естественного самоочищения прибрежных вод. Опыт эксплуатации пляжеудерживающих конструкций на Южном берегу Крыма (ЮБК) показал, что в межбунных отсеках часто наблюдаются застойные явления, скопление разного рода мусора и загрязняющих веществ. Это значительно уменьшает рекреационную привлекательность пляжей (рис. 1).

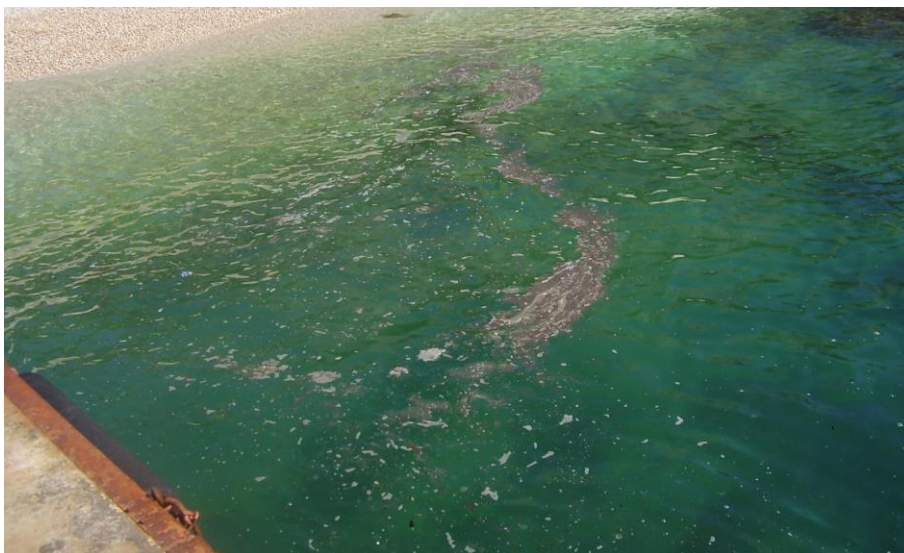


Рис. 1. Скопление загрязняющих примесей в межбунном пространстве на ЮБК
Fig. 1. Accumulation of contaminating admixtures between the piers on the CSC

В бесприливном Черном море одним из немногих естественных процессов, способствующих очищению акватории прибрежных вод в летний курортный период, является апвеллинг, который в отечественной терминологии обычно называют сгоном, часто не различая при этом вызывающие его физические причины.

Представления о причинах возникновения прибрежного апвеллинга в Черном море, об особенностях динамики вод в процессе его развития неплохо освещены в ряде работ, основанных как на теоретических расчетах, так и на многочисленных натурных наблюдениях и анализе спутниковых данных [1–4]. Наибольшее количество публикаций посвящено региональным особенностям развития и протекания апвеллинга, например по румынскому [4, 5] и турецкому побережью [6, 7], восточной части моря [6]. В наилучшей степени апвеллинг изучен в районе ЮБК, которому посвящено большое количество статей, из последних по времени отметим публикации [9–13]. Гораздо хуже изучен апвеллинг у западного побережья Крыма (Каламитский и Каркинитский заливы, район п-ова Тарханкут) [14–16]. Так, в работе [14] рассмотрена пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма по данным

спутниковых наблюдений 2005–2008 гг. и рассчитана повторяемость явления для этого периода. На основании анализа спутниковых снимков показано, что апвеллинг очень редко распространяется вдоль всего побережья северо-западной части Черного моря и Крыма. В статье также отмечен уникальный случай 12–14 июня 2005 г., когда область пониженной поверхностной температуры распространилась вдоль всего побережья северо-западной части Черного моря и Крыма. Результаты численного моделирования позволили получить трехмерную структуру полей температуры, солёности, плотности и скорости дрейфовых течений, достигавших 20 см/с на поверхности моря, а также показали, что апвеллинг развивался равномерно вдоль всего побережья северо-западной части Черного моря и Крыма (за исключением южной части Каркинитского залива).

В работе [15, с. 56] показано, что «в Каламитском заливе повторяемость прибрежного апвеллинга, идентифицированного по аномалиям температуры поверхности моря, невелика (менее одного случая в год). Апвеллинг наблюдается главным образом в июне и июле и характеризуется понижениями температуры на ~ 4–5 °С. Апвеллинг, сопровождающийся экстремальными отрицательными аномалиями ТПМ (превышающими по абсолютной величине 7 °С), наблюдается крайне редко». Описано одно из таких экстремальных проявлений прибрежного апвеллинга в сентябре 2007 г. по данным гидрологической съемки Морского гидрофизического института (МГИ) на НИС «Эксперимент». Высказывается предположение, что главной причиной был подъем вод, возникший в результате вторжения струи Основного Черноморского течения. Трудно согласиться с авторами этой работы, относящими рассмотренный район к Каламитскому заливу. Согласно общепринятой классификации, к Каламитскому заливу относится акватория, заключенная между м. Лукулл и м. Евпаторийским. Очевидно, что в указанной статье речь идет об акватории Севастопольского взморья.

В работе [16] при рассмотрении причины понижения температуры поверхности воды в Каркинитском заливе использовались спутниковые данные *NOAA-15/17* с разрешением 1 км за май – октябрь 2005–2008 гг., данные реанализа и результаты моделирования по трехмерной численной модели. Анализ 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. 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, многие аспекты возникновения и развития апвеллинга у побережья Западного Крыма, прежде всего их статистические характеристики и связь с ветровыми условиями, в отличие от ЮБК, изучены недостаточно. Особенно это касается Каламитского залива и акватории к северо-западу от него (до м. Тарханкут). Цель настоящей работы – получение режимно-статистических характеристик апвеллинга на акватории, прилегающей к этому району, выявление связи с ветровыми условиями.

Использованные данные и методика анализа. В работе использовались данные многолетних регулярных наблюдений над ветром и температурой воды на морских гидрометеорологических станциях (МГ) Евпатория в 1921–2011 гг. и Черноморское в 1948–2011 гг., а также данные спутниковых наблюдений за температурой поверхности моря *NOAA-15/19* и *MetOp-2* с разрешением 1 км за май – октябрь 2005–2013 гг., проводимых 6–8 раз в сутки. Снимки были предоставлены отделом дистанционных методов исследований МГИ РАН (<http://dvs.net.ru>). Наличие апвеллинга определялось визуально по картам температуры поверхности моря по разнице между минимальной температурой воды в прибрежной зоне и температурой окружающих вод. Если эта разница превышала 3 °С и сохранялась на 2–3 снимках, то явление рассматривалось как проявление прибрежного апвеллинга.

При описании явления использовались следующие понятия: время начального развития (или становления), интенсивность, начальная скорость изменения температуры воды и продолжительность. Под периодом становления подразумевалась разница между временем начала сгона и появлением минимальных температур. За интенсивность апвеллинга принималась разность между температурой начала сгона и наименьшей фиксированной температурой. Продолжительность сгона определялась как временной интервал между началом сгона и временем, когда температура воды достигала тех же значений, что и до сгона. В некоторых случаях этому препятствовал процесс возникновения нового апвеллинга. Тогда время окончания старого определялось как время начала нового. В тех случаях, когда температура воды не достигала прежних значений, за окончание процесса принималось время выхода температуры воды в квазистационарный режим.

При определении критериев для выбора случаев апвеллинга важно обоснованно формализовать количественные характеристики изменений температуры. В любом случае это субъективный процесс, поэтому и результат во многом предопределяется таким выбором. Так, в работе [15] выборка производилась для отрицательных аномалий, превышающих по абсолютному значению 4, 5, 6 и 7 °С. Это удобно для разработки алгоритма расчетов, но в ряде случаев не позволяет выделить важные статистические свойства. Поэтому в данной работе применялась трудоемкая, однако, на наш взгляд, более обоснованная процедура. Она предполагала визуальный просмотр всех реализаций и выделение случаев апвеллинга с последующим расчетом указанных характеристик. В качестве критерия случая принималось значение отрицательных аномалий поверхностной температуры, превышавшее по абсолютному значению 3 °С.

В исследуемом районе и периоде года за все время наблюдений было выполнено относительно немного станций (около 50). Большая часть из них сделана в сентябре 1995 г. в ходе экспедиции МГИ на НИС «Эксперимент». Это не позволяет достаточно достоверно говорить о вертикальной стратификации температуры и солености. В связи с этим нами анализировался климатический массив гидрологических данных МГИ РАН с разрешением 10 × 15 миль [17]. Шесть узлов массива, наиболее близко расположенных к району исследований, были сведены в один, и по этим данным был определен годовой ход T , S – характеристик. Он показал, что вертикальная халинная структура отличается однородностью в зимний период и наибольшим развитием стратифи-

кации в весенний. Вертикальная термическая структура в рассматриваемом районе практически однородна в зимний период, а наиболее выражена с мая по сентябрь. Вертикальные градиенты температуры в сезонном термоклине отмечаются летом, начиная с глубин 15–20 м. На значительной части акватории Каламитского залива в летний период из-за малых глубин наблюдается изотермия, на отдельных станциях у дна отмечается градиентный по температуре слой. Типичный суточный ход температуры по данным МГ Евпатория в летний период составляет до 0,5 °С.

Результаты и их обсуждение. *Режимные характеристики.* Всего в период 1921–2011 гг. на МГ Евпатория нами было выделено 212 случаев апвеллинга, т. е. в среднем ежегодно происходит немногим более двух случаев. Наибольшее количество приходится на июль (33%), далее по убывающей: на июнь (26%), август (21%), май (16%). Наименьшее количество отмечается в сентябре, за весь 90-летний период таких случаев было всего 8 (4%). В работе [15] по данным за 1950–2008 гг. выделено 49 случаев (за критерий принято значение отрицательных аномалий поверхностной температуры, превышающее 4 °С). Аномалии же, превышавшие по абсолютному значению 5, 6 и 7 °С, наблюдались соответственно в 30, 16 и 9 случаях. Приводя гистограммы повторяемостей, авторы отмечают, что прибрежный апвеллинг имеет место главным образом в июне и июле, это совпадает с нашими данными по более продолжительной выборке. Расхождения отмечаются в повторяемости в мае и сентябре. Так, по данным работы [15], наименьшая повторяемость отмечается в мае, по нашим данным, – в сентябре.

Характерное время существования апвеллинга по данным МГ Евпатория составляет от 3 до 5 сут, что соответствует данным, приведенным в работе [16]. В подавляющем большинстве случаев суммарная продолжительность апвеллинга в конкретном году (май – сентябрь) варьировала в пределах от 2 до 15 сут, только в 20% случаев она составляла от 16 до 30 сут. За весь период наблюдений средняя суммарная продолжительность апвеллинга составила 11,8 сут. Интенсивность более чем в половине случаев составляет 5–8 °С (таблица). Согласно работе [16] типичные аномалии температуры составляют 10 °С, по данным тех же авторов – 3–4 °С [14].

Интенсивность и средняя скорость изменений температуры при апвеллинге по данным МГ Евпатория (1921–2011 гг.)
Intensity and average rate of temperature variation during upwelling based on the data of МН Yevpatoria (1921–2011)

Интенсивность, °С/ Intensity, °C	Процент от общего количества случаев/ Percent of total amount of cases	Средняя скорость изменения температуры, °С/ч/ Average rate of temperature variation, °C/h	Процент от общего количества случаев/ Percent of total amount of cases
2,6–5	27	до 0,05	37
5–8	55	0,05–0,1	38
8–10	11	0,1–0,2	20
более 10	7	более 0,2	5

Средняя скорость изменения температуры в 75% наблюдаемых случаев не превышала 0,1 °С/ч. В 5% случаев эта скорость была в два раза больше. В отдельных случаях она превышала 0,3 °С/ч, что наблюдалось в 1918, 1932, 1997 и 2008 гг. В качестве примера приведем событие 16–20 июля 2008 г. На МГ Евпатория апвеллинг проявился в виде двух волн понижения температуры. Первая волна понижения (с 23 до 19 °С) наблюдалась в начале суток 17 июля, вторая волна (с 20 до 16 °С) – в конце суток 17 июля. Если брать во внимание данные по ветру только на МГ Евпатория, то объяснить это понижение температуры невозможно. Действительно, в период, предшествующий понижению температуры воды, действовал западный ветер, но его скорость не превышала 5 м/с. Если же мы привлечем данные по ветру на МГ Черноморское и спутниковые снимки, то увидим, что в данном случае явление апвеллинга было характерно практически для всей акватории Крыма и прилегающих областей. Оно было вызвано устойчивыми и сильными западными ветрами, действовавшими с 12 по 16 июля 2008 г., в результате холодные воды начали распространяться на восток от м. Тарханкут и к 18 июля заняли весь Каламитский залив (рис. 2).

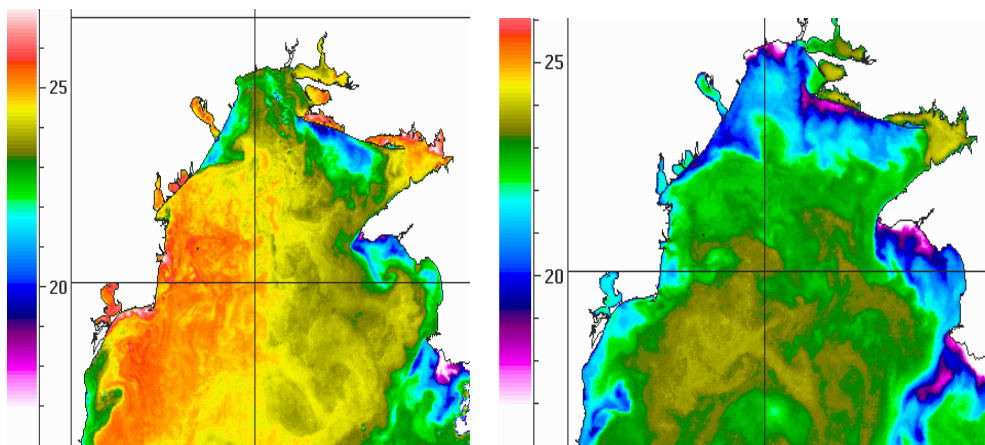


Рис. 2. Поверхностная температура по данным спутника NOAA-15/19. Слева – 15.07.2008 г. Справа – 18.07.2008 г. (снимки с сайта <http://dvs.net.ru>)

Fig. 2. Surface temperature from the NOAA-15/19 data. To the left – 15.07.2008, to the right – 18.07.2008 (the images are from site <http://dvs.net.ru>)

Сгон на МГ Евпатории не фиксировался уже 19 июля, хотя по спутниковым данным прослеживался вплоть до 20 июля. Апвеллинг, сопровождавшийся экстремальными отрицательными аномалиями поверхностной температуры (более чем на 11 °С), отмечался только в трех случаях. Такие уникальные события наблюдались в июле 1954, 1996 гг. и в августе 2000 г. Так, сгон в 1954 г. начался 16 июля 1954 г. и был вызван устойчивыми штормовыми западными ветрами. Но затем, вплоть до конца июля, поддерживался в основном северо-западным ветром (со скоростью 7–10 м/с). Интенсивность апвеллинга составила около 12 °С (рис. 3).

Здесь отметим, что на ЮБК типичная интенсивность составляет 10–12 °С, достигая в отдельных случаях 20 °С. Что касается периода становле-

ния, то за 1921–2011 гг. он в 75% случаев составлял от 1 до 4 сут, в 18% случаев был от 4 до 10 сут и только в 7% случаев превышал 10 сут.

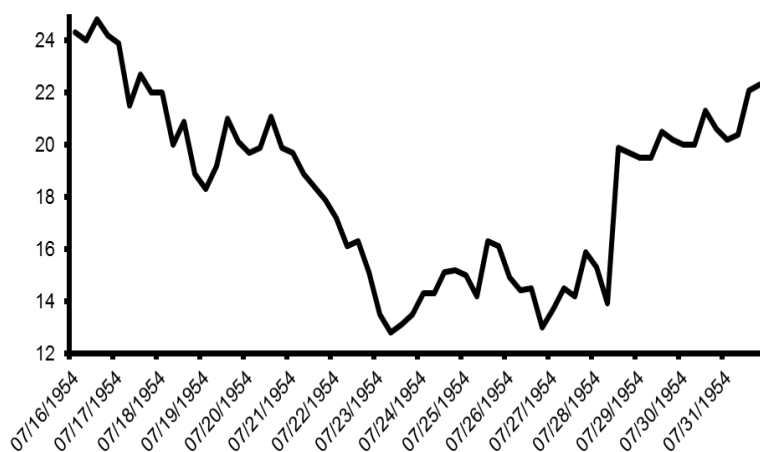


Рис. 3. *Ход температуры (°C) на МГ Евпатория 16–31 июля 1954 г. по срочным данным*
Fig. 3. *Temperature variation (°C) at the MH Yevpatoria on July, 16–31 based on current data*

Межгодовая изменчивость. Ежегодно происходит 1–2 события апвеллинга (56% случаев), реже 3–4 (35% случаев), крайне редко – более 4 раз (6% случаев)*. Всего один раз (1965 г.) они не фиксировались. Какой-либо статистически достоверной периодичности в межгодовой изменчивости событий апвеллинга и достоверного тренда не выявлено.

Связь с ветровыми условиями. В работе [14] апвеллинг в Каламитском заливе выделен в отдельную структурную зону. Авторы отмечают, что «типичная глубина акватории 50 м, в южной части залива достигает 70 м. Поэтому наблюдаемый апвеллинг характеризуется как экмановский и образуется при воздействии ветра северо-западного направления» [14, с. 162]. Заметим, что глубины на внешней стороне Каламитского залива в действительности составляют менее 30 м, изобата 20 м проходит в 7–8 км от берега (на ЮБК – около 400 м), а сам залив относится к мелководным. Но даже если бы глубины действительно достигали 70 м, то утверждать, что наблюдаемые апвеллинги только экмановские, вряд ли возможно, поскольку и у приглубых берегов ЮБК часто наблюдаются сгонные апвеллинги, вызванные кратковременными сильными ветровыми воздействиями [13].

Для определения связи явлений апвеллинга в Каламитском заливе с ветровыми условиями использована следующая методика: для каждого случая непосредственно перед его началом выбирались значения направления и скорости ветра по 3–4 срокам подряд (сутки). Это делалось с целью уравнять вес каждого случая при расчете вероятностных характеристик. Поскольку в ряду содержались измерения с разным количеством сроков, это не позволило дос-

* Горячкин Ю. Н. Апвеллинг у берегов Западного Крыма // Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология : Тезисы докладов научной конференции. Севастополь, 26–30 сентября 2016 г. Севастополь : ФГБУН МГИ, 2016. С. 145.

товерно оценить накопленный ветер, который, как известно, наряду с его направлением является определяющим для развития апвеллинга [1]. Необходимо отметить, что усиление ветра в период, предшествующий развитию апвеллинга, наблюдалось не всегда. Такие случаи при расчете не учитывались (их оказалось около 30%). В целом их можно отнести к явлениям апвеллинга, не связанным с локальными атмосферными воздействиями. Один из таких случаев приведен выше на рис. 3.

Проанализирован весь исходный ряд по температуре воды на МГ Евпатория. После выборки организован сплошной ряд, по нему рассчитаны режимные характеристики, анализ которых показал, что явлению апвеллинга предшествуют ветры следующих направлений. Преобладающим является ветер от северного направления (36% случаев), у ветров от западного направления повторяемость 26%, северо-западного – 20%, восточного – 14%. Повторяемость других направлений очень мала. На основании этого анализа можно сделать, как минимум, вывод о том, что явление апвеллинга в Каламитском заливе определяется не только экмановским механизмом, возникающим при действии вдольберегового (в нашем случае западного, северо-западного) ветра, но и чисто сгонным эффектом, возникающим за счет сильного ветра с берега. Конечно, такой механизм наиболее эффективен, когда термоклин расположен близко к поверхности. В среднем соотношение экмановских и сгонных апвеллингов по этим данным близко к соотношению 50 : 50%, что следует из описанных выше соображений.

Проявление в поле поверхностной температуры. Выше были рассмотрены статистические характеристики по данным МГ. Такие данные позволяют довольно четко выделить явление апвеллинга и его развитие во времени, но не позволяют оценить его пространственные масштабы. По описанным выше спутниковым данным для каждого года рассчитывалась повторяемость апвеллинга, аналогичные характеристики рассчитывались и по данным прибрежных станций.

Одной из проблем, возникающих при использовании спутниковой информации, является невозможность проведения достоверного анализа распределения поверхностной температуры на протяжении длительных периодов времени в связи с тем, что на многих снимках исследуемый район бывает закрыт облачностью. Кроме этого, особенности размещения МГ Евпатория не позволяют отнести изменения температуры воды ко всей прилегающей акватории. Поэтому трудно ожидать хорошего совпадения результатов, полученных с помощью спутниковой информации, с результатами по данным МГ. Тем не менее, на наш взгляд, получены достаточно близкие результаты. Так, если рассматривать экстремумы, то максимальное количество апвеллингов было в 2011 г. (семь по спутниковым, пять по контактными данным), минимальное число отмечалось в 2010 г. (ноль по спутниковым, один по контактными данным) (рис. 4). Разница в остальные годы составляют от одного до трех случаев, причем количество случаев по контактными данным больше, чем по спутниковым, что естественно по указанным выше соображениям. Примерно такие же особенности можно отметить и для продолжительности апвеллингов (рис. 4), хотя ее определение по данным МГ являлось более проблематичным, что могло увеличить ошибки.

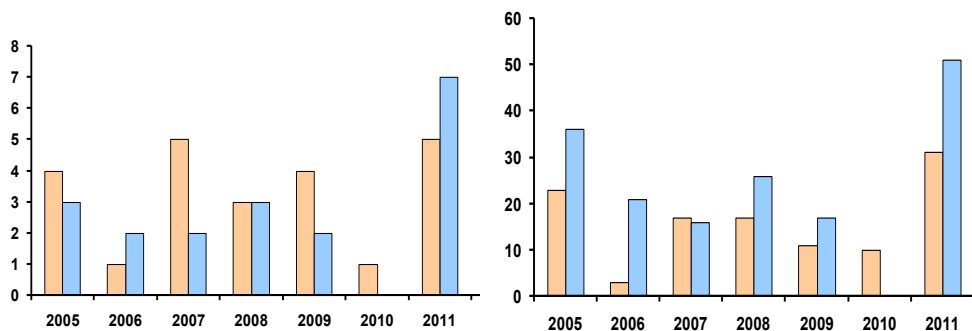


Рис. 4. Межгодовая изменчивость количества случаев апвеллинга (слева) и продолжительности в сутках (справа). Синим – по спутниковым данным, желтым – по контактными

Fig. 4. Inter-annual variability of the upwelling quantity (to the left) and its duration in days (to the right). Blue color denotes satellite data, yellow color – contact ones

Просмотр конкретных снимков за период с 2005 по 2013 гг. и сопоставление с полем ветра позволили выявить два основных сценария развития апвеллинга.

1. Процесс развивается непосредственно в Каламитском заливе или прилегающих районах. При этом наблюдается ветер с берега (северный, северо-восточный, восточный) в виде относительно короткого, но сильного импульса. Следуя данным [1], такой апвеллинг можно отнести к сгонному. Как пример приведем случай апвеллинга 3 июля 2006 г. (рис. 5).

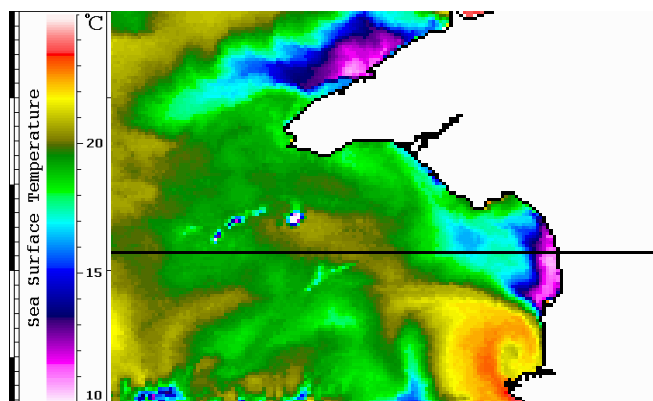


Рис. 5. Температура поверхности моря 3 июля 2006 г. по данным спутника NOAA-17

Fig. 5. Sea surface temperature on July 3, 2006 based on the NOAA-17 satellite data

2 июля в течение суток действовал устойчивый, сильный восточный ветер (10–12 м/с). С утра температура у берега стала понижаться и за несколько часов упала с 23,5 до 19,2 °С. После ослабления ветра температура в течение суток вернулась к исходному значению. Здесь, видимо, был случай сгонного апвеллинга. Для него, как правило, характерно быстрое развитие и затухание процесса. Контрасты температуры относительно небольшие. Всего за исследованный период мы зафиксировали двенадцать таких случаев. Единственный случай такого рода апвеллинга, при котором инструментально были зафиксированы течения, приведен нами в работе [18]. Так, 12 июля 1992 г. дат-

чик температуры измерителя течений МГИ 1301 зафиксировал в 1 м от дна (12 м) у м. Евпаторийского, понижение температуры воды с 18,7 до 12,2 °С. Апвеллинг вызвал устойчивый сильный (12–15 м/с) восточный ветер, который действовал около суток. Течение, которое до этого было направлено на юго-запад, изменило свое направление в придонном слое на северное (в сторону берега), а скорости возросли от 5–6 см/с до 12–14 см/с. После прекращения действия восточного ветра гидрологическая ситуация довольно быстро восстановилась [18].

2. Процесс начинает развиваться у м. Тарханкут, у относительно приглубокого берега. При этом ветер может быть западным, северо-западным, юго-западным. После возникновения апвеллинга холодные воды в результате адвекции на поверхности начинают распространяться вдоль берега на юго-восток. Это может происходить в виде нескольких волн. В отдельных случаях такая ситуация может существовать довольно долго, вплоть до десятков дней. Контрасты температуры существенно больше, чем для первого типа. Пример такого апвеллинга приведен на рис. 6.

Начало апвеллинга можно отнести к 20 июля 2013 г., когда у м. Тарханкут сформировалась зона пониженной температуры, которая стала распространяться вдоль берега. Уже 21 июля на МГ Евпатория была зафиксирована первая волна понижения температуры на 5 °С (рис. 7). Вторая волна понижения температуры, на этот раз на 9 °С (до 14 °С), на МГ Евпатория фиксировалась 3–11 августа. Таким образом, апвеллинг в районе от м. Тарханкут до Каламитского залива с разной степенью локализации существовал более 20 дней. За исследованный период были зафиксировано 20 подобных случаев. Таким образом, для конкретного периода времени (2005–2011 гг.) соотношение экмановского и сгонного апвеллинга составило 60 : 40%. Это отличается от ситуации в районе ЮБК, где преобладает экмановский апвеллинг. Необходимо также отметить, что воды апвеллинга, сформировавшегося в районе Тарханкута, достигают Каламитского залива в основном в случае действия сильных и продолжительных ветров от западного румба, что летом является довольно редким случаем.

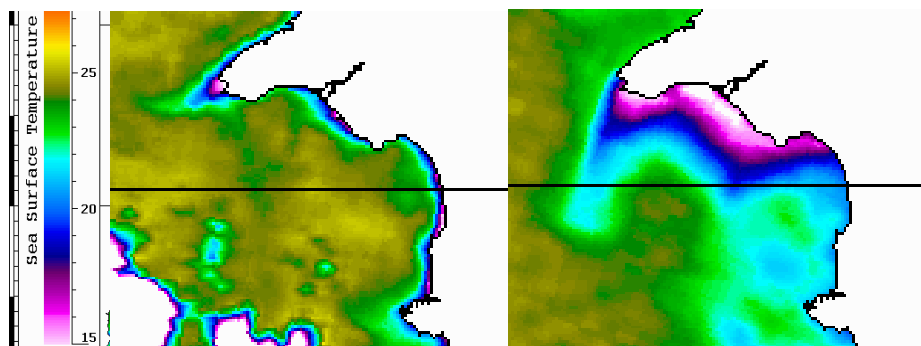


Рис. 6. Температура поверхности моря 22 июля 2013 г. (слева) и 5 августа 2013 г. (справа) по данным спутника NOAA-17

Fig. 6. Sea surface temperature on July 22, 2013 (to the left) and August 5, 2013 based on the NOAA-17 satellite data

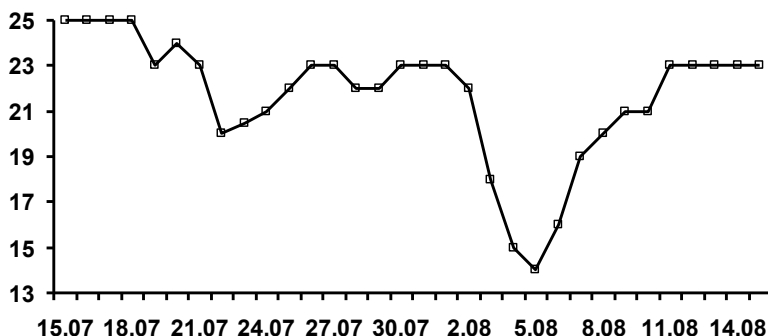


Рис. 7. Температура поверхности моря по данным МГ Евпатория с 15 июля по 15 августа 2013 г.
Fig. 7. Sea surface temperature based on the MH Yevpatoria data (July 15 – August 15, 2013)

К сожалению, отсутствие гидрологических данных в период развития и разрушения апвеллинга не дает возможности выяснить, с каких горизонтов поднялись холодные воды, и сравнить теоретический пространственный масштаб прибрежного апвеллинга (бароклинный радиус деформации Россби) с наблюдаемым по спутниковым данным.

Закключение. Вышеизложенное позволяет сделать следующие основные выводы:

- В период 1921–2011 гг. на МГ Евпатория выделено 212 случаев апвеллинга. Наибольшее количество случаев приходится на июль, далее по убывающей: на июнь, август, май, сентябрь.

- В подавляющем большинстве случаев продолжительность апвеллинга варьировала в пределах от 2 до 15 сут, только в 20% случаев она составляла от 16 до 30 сут. Средняя продолжительность составила 11,8 сут.

- В 75% случаев период становления апвеллинга составлял от 1 до 4 сут, в 18% случаев он был от 4 до 10 сут и только в 7% случаев превышал 10 сут.

- Средняя скорость изменения температуры в 75% наблюдаемых случаев апвеллинга не превышала 0,1 °C/ч. В 5% случаев эта скорость была в два раза больше. В 1918, 1932, 1997 и 2008 гг. она превышала 0,3 °C/ч.

- Аномалии, превышающие 7 °C, наблюдались в 39 случаях, из них стоит особенно выделить редкие случаи понижения температуры больше чем на 11 °C (июль 1954 и 1996 гг., август 2000 г.).

- В многолетней изменчивости событий апвеллинга какой-либо выраженной периодичности и многолетней тенденции к уменьшению или увеличению их числа не отмечается. Ежегодно происходит 1–2 события апвеллинга (56% случаев), реже 3–4 (35% случаев), более четырех раз зарегистрировано в шести случаях.

- Явление апвеллинга в Каламитском заливе определяется не только экмановским механизмом, возникающим при действии вдольберегового ветра, но и чисто стгонным эффектом, возникающим за счет сильного ветра с берега, соотношение их повторяемости примерно равное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А. С., Иванов В. А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). Киев : Наукова думка, 1992. 244 с.
2. Иванов В. А., Михайлова Э. Н. Апвеллинг в Чёрном море. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 92 с.
3. Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе данных спутникового мониторинга / Р. В. Боровская [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2008. № 2. С. 26–36.
4. Mihailov M.-E., Sandel G.-V. The upwelling phenomena during summer on the Romanian littoral of the Black Sea (Mamaia Bay) // Proceedings of the Workshop on «Understanding and Modelling the Black Sea Ecosystem in Support of Marine Conventions and Environmental Policies». 2005. P. 15–22.
5. Mihailov M.-E., Tomescu-Chivu M.-I., Dima V. Black Sea water dynamics on the Romanian littoral – case study: The upwelling phenomena // Romanian Reports in Physics. 2012. Vol. 64, No. 1. P. 232–245. URL: https://www.researchgate.net/profile/Maria_Emanuela_Mihailov/publication/286998461_Black_sea_water_dynamics_on_the_Romanian_littoral_-_Case_study_The_upwelling_phenomena/links/56e464a708ae98445c1ef556/Black-sea-water-dynamics-on-the-Romanian-littoral-Case-study-The-upwelling-phenomena.pdf (дата обращения: 10.04.2018).
6. Sur H. I., Özsoy E., Ünlüata Ü. Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // Progress in Oceanography. 1994. Vol. 33, iss. 4. P. 249–302. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90020-5)
7. Coastal deep ocean interactions in the Black Sea and their ecological environmental impacts / H. I. Sur [et al.] // Journal of Marine Systems. 1996. Vol. 7, iss. 2–4. P. 293–320. [https://doi.org/10.1016/0924-7963\(95\)00030-5](https://doi.org/10.1016/0924-7963(95)00030-5)
8. Сильвестрова К. П., Зацепин А. Г., Мысленков С. А. Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 521–530. doi:10.7868/S0030157417040013
9. Synoptic upwelling and cross-shelf transport processes along the Crimean coast of the Black Sea / G. Gawarkiewicz [et al.] // Continental Shelf Research. 1999. Vol. 19, iss. 8. P. 977–1005. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(99\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(99)00003-5)
10. Горячкин Ю. Н. Основные тенденции многолетней изменчивости сгонно-нагонных колебаний уровня в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 28–31.
11. Боровская Р. В., Ломакин П. Д., Попов М. А. Апвеллинг в Балаклавской бухте и прилегающих акваториях Черного моря на базе спутниковых данных // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 20. С. 171–179.
12. Репетин Л. Н., Романов А. С., Чурилова Т. Я. Апвеллинг в зоне антициклонической завихренности на шельфе Южного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 22. С. 205–227.
13. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. Термохалинная структура и динамика вод на Черноморском подспутниковом полигоне // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 311–334.
14. Михайлова Э. Н., Музылева 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 : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 20. С. 160–170.

15. *Джиганин Г. Ф., Полонский А. Б., Музылёва М. А.* Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в конце летнего сезона и его причины // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 4. С. 45–57.
16. *Михайлова Э. Н., Полонский А. Б., Музылёва М. А.* О причинах понижения температуры поверхности воды в Каркинитском заливе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 6. С. 28–35.
17. *Belokopytov V. N.* Marine information system in oceanography and meteorology of the Black Sea // International conference «Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea. Similarities and differences of two interconnected basins», Athens, Greece, 23–26 February 1999, abstr. Brussels : European Commission report, 2000. P. 419.
18. *Горячкин Ю. Н.* Придонные течения в Каламитском заливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 17. С. 258–264.

Об авторе:

Горячкин Юрий Николаевич, ведущий научный сотрудник отдела гидрофизики шельфа, ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), член рабочей группы «Морские берега» Совета РАН по проблемам Мирового океана, доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2807-201X, ResearcherID: I-3062-2015**, yngor@yandex.ru