Апвеллинги Чёрного моря

Р. Р. Станичная, С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mail: rrsta@mail.ru

В работе рассмотрены характеристики проявления прибрежных апвеллингов в Чёрном море на основе анализа спутниковых данных о температуре морской поверхности за период с 1997 по 2011 г., для Южного берега Крыма — по 2015 г. Выделены районы с наиболее часто встречающимися апвеллингами в период расширенного лета с 15 мая по 15 сентября. Показана существенная межгодовая изменчивость числа апвеллингов, выделена квазидвухлетняя периодичность. Для ряда выбранных районов рассмотрены пространственные особенности проявления апвеллингов и оценены количественные параметры: вдольбереговая протяжённость апвеллинга, занимаемая площадь на морской поверхности, перепад температур между водами апвеллинга и невозмущёнными окружающими водами. Известно, что основная причина возникновения прибрежного апвеллинга — усиление благоприятной вдольбереговой компоненты скорости ветра. В Чёрном море это происходит при условии нахождения берега слева от направления благоприятной вдольбереговой компоненты скорости ветра. Совместный анализ карт концентрации хлорофилла и температуры поверхности не позволил выявить однозначную связь между этими параметрами. Наблюдались ситуации как с повышением концентрации хлорофилла в зоне апвеллинга, так и с понижением.

Ключевые слова: апвеллинг, дистанционное зондирование, Чёрное море, вдольбереговой ветер, поверхность моря, геострофическая составляющая, глубинные воды

Одобрена к печати: 01.07.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207

Введение

Прибрежные экмановские апвеллинги, вызываемые благоприятной вдольбереговой компонентой ветра (V_{бер}), являются типичным событием для Чёрного моря. В Северном полушарии благоприятным будет ветер, от направления которого берег находится слева. Чёрное море — замкнутый бассейн, поэтому для ветра любого направления всегда найдётся участок береговой линии, для которого ветер является благоприятным для возникновения апвеллинга. Апвеллинг играет важную роль в процессах вертикального и горизонтального обмена физических, химических и биологических компонент морской экосистемы (Костяной, 2000). Исследование характеристик прибрежных апвеллингов в Чёрном море проводится с середины прошлого века, сначала на основе контактных данных (Богданова, Кропачев, 1959; Сорокин, 1982; Толмазин, 1963) и в дальнейшем с использованием спутниковых данных и модельных расчётов (Гинзбург, 1994; Гинзбург, Федоров, 1985; Гришин, 1993; Коснырев и др., 1996; Oguz et al., 1992; Sur et al., 1994). Именно с появлением спутниковых данных, позволивших регистрировать более холодные воды, стало возможным изучение пространственно-временной изменчивости апвеллингов (Гинзбург и др., 1997, 1998; Джиганшин и др., 2010; Михайлова и др., 2009). Был проведён анализ результатов численного эксперимента по моделированию апвеллингов в северо-западной части Чёрного моря с сопоставлением со спутниковыми данными (Дивинский и др., 2017; Коснырев и др., 1996). Целевой эксперимент по изучению апвеллинга в районе Севастополя на основе судовых и спутниковых измерений был описан в работе (Gawarkiewicz et al., 1999). Некоторые статистические характеристики проявления апвеллингов для разных интервалов времени приведены в исследованиях (Боровская, Боровская, 2015; Боровская и др., 2005; Полонский, Музылева, 2016). Региональные особенности апвеллингов в районе Геленджика рассмотрены в публикациях (Зацепин и др., 2016; Сильвестрова и др., 2017). Особенный интерес представляет изучение апвеллингов в период существования развитого сезонного термоклина, который затрудняет процессы вертикального обмена, в данной статье рассматривается период с 15 мая по 15 сентября.

В настоящей работе на основе долговременных рядов спутниковых наблюдений проведён статистический анализ проявления апвеллингов в температуре морской поверхности и особенности апвеллингов в ряде характерных районов Чёрного моря.

Используемые данные

В работе использованы данные сканеров AVHRR (англ. Advanced Very-High-Resolution Radiometer), получаемые со спутников NOAA-12, NOAA-14-19 (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований), до 10 снимков ежедневно, которые принимаются спутниковой станцией Морского гидрофизического института РАН с 1997 г., и MetOp (англ. Meteorological Operational satellite) — с 2008 г. Дополнительно использованы данные по температуре и концентрации хлорофилла со сканера MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua (http:// dvs.net.ru/mp/data/main.shtml). Это позволяет проводить исследования явлений на морской поверхности с характерными временными масштабами, равными нескольким часам. Поскольку время существования среднего апвеллинга в Чёрном море составляет 5-7 сут (хотя встречаются случаи, когда процесс длится 14-15 сут), то спутниковый мониторинг даёт большие возможности при изучении процессов развития и трансформации апвеллинга по полям поверхностной температуры, так как апвеллинг легко идентифицируется по характерным температурным контрастам в тёплый период года. Дополнительно использованы данные о скорости ветра по результатам модельных реанализов MERRA (англ. Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications) и GFS (англ. Global Forecast System -Глобальная система прогнозирования).

Выделение интенсивных зон апвеллингов

На первом этапе работы был проведён анализ ряда спутниковых изображений сканеров AVHRR спутников NOAA с 1997 по 2011 г. для всей акватории Чёрного моря. Для Южного берега Крыма (ЮБК) временной интервал наблюдений был продлён до 2015 г. Изучение частоты проявления апвеллингов в различных районах за период расширенного лета каждого года позволило выделить зоны с высокой активностью апвеллингов. В общей сложности был проанализирован ряд из более чем 10 000 спутниковых AVHRR-изображений для всего Чёрного моря. В результате такого анализа на морской акватории вдоль всего побережья было выделено 12 областей с приблизительно одинаковой направленностью береговой линии. Самыми активными областями по частоте и продолжительности явления ветрового апвеллинга, а также по температурному контрасту между поднятой водой и окружающей апвеллинг являются ЮБК (N1), Юго-Западная часть Крыма (N2), Западное побережье Чёрного моря (N3) и район Тендровской Косы (N6). Следующими по порядку уменьшения интенсивности прибрежного подъёма холодной воды под воздействием ветра идут Юго-восточная (N4) и Северо-западная части Крыма (N8), часть прибрежной полосы севера Турции (N5) и район между Одесским заливом и Днепро-Бугским лиманом (N7). Далее следуют районы с нечастым проявлением апвеллингов: Черноморская часть Керченского пролива (N11), район Новороссийска (N9), побережье Грузии (N10) и район пролива Босфор (N12). На основе полученного анализа была построена карта зон интенсивности апвеллингов, которая представлена на рис. 1 (см. с. 197), и получена табл. 1, в которую внесены названия районов Чёрного моря. Порядок номеров в таблице соответствует цифрам, проставленным на карте. В других, не отмеченных на карте районах Чёрного моря события проявления апвеллингов практически не наблюдались или это были единичные случаи. Причиной является малая вероятность благоприятных ветров для возникновения апвеллинга.

N⁰	Название области
1	ЮБК
2	Юго-западное побережье Крыма
3	Западное побережье Чёрного моря
4	Юго-восточное побережье Крыма
5	Турецкое побережье Чёрного моря
6	Тендровская коса
7	Северная часть Северо-западного шельфа
8	Северо-западное побережье Крыма
9	Район Новороссийска
10	Кавказское побережье
11	Керченский пролив
12	Район Босфора



Рис. 1. Карта Чёрного моря с указанием зон частых проявлений апвеллингов (см. *табл.* 1)

Таблица 2. Статистика прибрежных апвеллингов для периода расширенного лета каждого года
(124 дня) (общее число апвеллингов/число мощных апвеллингов/суммарная длительность
апвеллингов)

	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
ЮБК	7/5/31	5/4/44	4/3/30	10/5/62	5/3/25
Юго-западное побережье Крыма	6/2/22	7/4/61	6/4/23	12/5/55	7/1/20
Западное побережье Чёрного моря	4/1/21	5/3/40	2/2/16	7/2/68	8/5/42
Турецкое побережье Чёрного моря	4/0/5	6/5/64	4/2/37	14/6/58	10/3/37
Тендровская коса	5/4/14	7/7/69	7/4/32	11/3/71	14/3/43
Северо-западное побережье Крыма		4/0/14	4/5/21	11/2/66	2/1/19
	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.
ЮБК	6/1/20	9/5/51	12/3/56	7/2/35	12/4/69
Юго-западное побережье Крыма	6/0/23	8/4/56	10/3/63	12/4/47	13/3/62
Западное побережье Чёрного моря	5/1/17	6/6/76	8/3/45	5/3/31	13/3/51
Турецкое побережье Чёрного моря	10/3/64	11/6/116	10/5/55	8/3/37	12/3/56
Тендровская коса	8/5/30	10/2/78	13/5/96	8/3/43	16/5/88
Северо-западное побережье Крыма	12/0/35	4/2/38	4/0/14	13/3/43	13/4/53
	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.
ЮБК	10/3/43	10/4/53	10/3/42	10/2/44	10/5/70
Юго-западное побережье Крыма	8/3/42	9/3/56	9/1/33	10/0/36	9/4/61
Западное побережье Чёрного моря	12/7/84	9/3/59	10/5/54	7/4/44	10/3/59
Турецкое побережье Чёрного моря	13/7/90	8/6/91	10/6/93	7/2/53	11/6/59
Тендровская коса	15/4/48	12/7/90	14/5/66	13/2/30	10/6/64
Северо-западное побережье Крыма	7/2/23	9/0/20	9/3/40	10/2/35	9/3/45

Исследования показали, что общая длительность апвеллингов существенно варьирует от года к году. Результаты анализа спутниковых изображений на предмет частоты возникновения прибрежных апвеллингов в различных районах Чёрного моря за длительный период времени представлены в *табл. 2*. В первом столбце даны названия районов, которые были выделены как активные зоны проявления апвеллингов. В следующих столбцах представлены данные о количестве апвеллингов в Чёрном море за период расширенного лета в каждом из районов начиная с 1997 по 2011 г. с разделением их на слабые (перепад температуры <5 °C и продолжительность <3 сут) и мощные, а также их ежегодная суммарная длительность.

Минимальные значения температур в апвеллинге могут достигать 8-9 °C, максимальные перепады температур с окружающей апвеллинг водой равнялись 15 °C. Чем мощнее апвеллинг, тем дальше он распространяется по поверхности моря. Сумма площадей всех апвеллингов (S_a), одновременно наблюдавшихся по всему морю, в какой-то момент времени может достигать 12-14 % от всей площади Чёрного моря (S_{bs}). В *табл. 3* даны результаты исследований по всем крупным апвеллингам на ЮБК за 2003 г.: их длительность *L*, перепад температур ΔT и соотношения их площади $S_a \kappa S_{bs}$ в процентах. Такие активные процессы подъёма холодной воды у берега существенно влияют на процессы вертикального обмена.

№ района	Длительность апвеллингов	Δ <i>T</i> между окружающей водой и водой апвеллинга	Занимаемая площадь от $S_{bs}, \%$
1	22—23 мая	11,3–19,6	0,0699
2	7—11 июня	15,6–19,7 11,2–19,7	0,043
3	13—20 июня	10,0–21,6 <10,0–20,7	0,244
4	22—25 июня	11,6–22,5	0,058
5	27 июня — 2 июля	$10,7-22,0 \\ 11,5-22,7 \\ 10,0-22,2$	0,094
6	7—21 июля	<10,0-23,0 <10,0-22,2	2,61
7	22—25 июля	17,5–23,7	0,0123
8	13-16 августа	17,3–23,6	0,031

Таблица З. Апвеллинги на ЮБК в 2003 г.

По данным, внесённым в *табл. 2*, построена зависимость от времени общей длительности всех апвеллингов в период расширенного лета начиная с 15 мая по 15 сентября с 1997 по 2011 г. для областей N1, N2, N3, N5, N6 и N8 (*puc. 2*).



Рис. 2. График зависимости общей длительности апвеллингов от года для различных областей Чёрного моря (N1, N2, N3, N5, N6, N8) за период расширенного лета

По графику на *puc. 2* с 1997 по 2002 г. наблюдается некоторая квазидвухгодичная периодичность и синхронность общей длительности апвеллингов для всех активных зон. После 2002 г. происходит сдвиг периодичности максимумов суммарной длительности апвеллингов в разных областях, и картинка становится более хаотичной. Рассмотрим подробнее особенности каждой из выделенных зон, показанных на карте *puc. 1*.

Южный берег Крыма

Форма проявления апвеллинга на морской поверхности для данного района определяется не только контуром береговой линии, скоростью и направлением ветра, но и взаимодействием апвеллинга с окружающими разномасштабными динамическими структурами. В качестве примера влияния на апвеллинг и его форму различных факторов рассмотрим серию изображений на *рис. 3*, на которых представлен процесс развития апвеллинга у ЮБК с 11 по 20 июня 2011 г.



Рис. З. Пример развития, затухания и отрыва апвеллинга от берега у ЮБК



Рис. 4. Отрыв апвеллинга от ЮБК

Береговая линия ЮБК представляет собой выпуклую, изрезанную кривую, обращённую выступающей частью на юг. Двигаясь с востока на запад, мимо неё с южной стороны проходит Основное Черноморское течение (ОЧТ). В направлении на запад от ЮБК, ближе к шельфовой зоне, находится область активного формирования антициклонических вихрей. Под воздействием всех этих факторов поднятая с глубины холодная вода апвеллинга захватывается цепочкой вихрей, вовлечённых в движение с ОЧТ на юго-запад от ЮБК, и уносится вихрем вдоль линии свала глубин, как, например, на *рис. Зг.* В случае соприкосновения периферийной зоны

вихря с водой апвеллинга холодная вода может двигаться вдоль границы вихря в центральную часть Чёрного моря на расстояния до 60—70 км, ширина развитого апвеллинга у ЮБК может достигать 30 км. На *рис. 3* показан характерный для ЮБК пример развития мощного апвеллинга, который наблюдался с 11 по 20 июня 2011 г.

Он зародился восточнее южного мыса Крыма (см. *рис. 3a*), затем по мере его развития начал смещаться на юго-запад, двигаясь вдоль береговой линии (см. *рис. 36*, *в*). По мере приближения апвеллинга к м. Херсонес его южная часть начала вытягиваться (см. *рис. 3в*), и холодная вода апвеллинга была захвачена периферией сначала небольшого антициклона около м. Херсонес (см. *рис. 3г*), затем второго антициклона большего размера (см. *рис. 3д*) и отнесена последним вихрем на юго-запад. Затем продолжила двигаться вдоль границы вихря на запад (см. *рис. 3в*, *г*). 20 июня апвеллинг оторвался от Крыма, его холодный след наблюдался в центральной части Чёрного моря до 27 июня. Отрыв холодной струи может происходить по другому сценарию (*рис. 4*), результат зависит от положения центра вихря в момент приближения к нему вод апвеллинга. Если центр вихря находится вблизи 200-метровой изобаты, то холодная вода, попав на край вихря, переносится им на юго-запад вдоль свала глубин.

Тендровская Коса

Этот район является одним из самых активных по количеству и длительности апвеллингов. Береговая линия Тендровской косы имеет форму практически идеально прямой линии, направленной с северо-запада на юго-восток. Глубина Чёрного моря в этом районе неболь-



Рис. 5. Апвеллинг у Тендровской Косы 23 июня 2000 г.

шая — порядка 10-20 м. Вдольбереговая компонента ветра и небольшая глубина моря являются главными факторами, определяющими форму и интенсивность апвеллинга. На рис. 5 представлено спутниковое изображение типичного для Тендровской косы апвеллинга с мощным сгоном и подъёмом холодной воды, который длился с 31 мая по 3 июля 2000 г., имел два максимума: 23 и 28 июня. В течение двух дней перед началом апвеллинга 29 и 30 мая вдольбереговая компонента ветра V_{бер} составляла 12,2 и 9,5 м/с соответственно. Разность между температурами окружающей и поднятой поверхностной воды ΔT в дни максимального развития достигала 11,3 °C, минимальная температура холодной воды T_{\min} равнялась 10,7 °C, а максимальная температура окружающих вод T_{max} была 22 °С.

На рисунке можно наблюдать довольно сложную форму апвеллинга с множеством нестационарных когерентных структур (филаментов), которые переносят холодные и богатые биогенными элементами поверхностные воды на значительное расстояние от берега (Гинзбург, 1995). По спутниковому изображению были измерены пространственные размеры апвеллинга: его длина вдоль береговой линии L равнялась примерно 115 км, ширина колебалась от 10 до 22 км. Занимаемая апвеллингом на поверхности моря площадь S_a достигала 4093 км², что составляло 1,12 % от всей площади Чёрного моря. Многочисленные филаменты в районе Тендровской косы простирались в направлении, практически перпендикулярном направлению береговой линии, на расстояния L_{ϕ} до 95 км. Такие мощные апвеллинги с подобной структурой проявления на поверхности моря являются довольно частым событием у Тендровской косы.

Западное побережье Чёрного моря

Западное побережье имеет очень протяжённую и сильно изрезанную береговую линию. Её длина с небольшим уклоном с севера-востока на юго-запад составляет примерно 570 км. Направление береговой линии практически сохраняется по всему побережью. При однородном поле ветра вдоль всей длины Западного побережья наблюдается одновременное проявление апвеллинга во всём районе N3. Но подобные ситуации возникают довольно редко. Из-за большой протяжённости данного района поле ветра неоднородно по величине и по направлению вдоль линии берега, что приводит к неодновременному подъёму на поверхность холодных вод на различных участках западного побережья. Так, 15 мая 2013 г. с 12:00 до 18:00 ветер усилился с 4 до 6–7 м/с в северной части Западного побережья. Направление береговой линии. 17 мая на спутниковых изображениях на морской поверхности появляются первые признаки апвеллинга в верхней части Западного побережья и усиливается ветровая $V_{бер}$ составляющая для средней и южной частей побережья от 7 до 10 м/с. Своего максимума, 9–10 м/с, ветровая компонента достигает 27–28 мая.



Рис. 6. Изображения AVHRR NOAA и MetOp-2, показывающие развитие апвеллинга на западном побережье Чёрного моря в 2013 г.

На рис. 66 показан апвеллинг, который достиг своего максимального развития 28 мая, и в это время проявились максимальные температурные контрасты на поверхности моря. Его

протяжённость в этот момент времени достигала 435 км. Максимальный перепад температур между поднятой и окружающей водами ΔT равнялся 15,5 °C. Минимальное значение температуры морской воды в апвеллинге было 10 °C, а температура водной массы за пределами апвеллинга T_{max} составляла 24,5 °C. С 1 июня 2013 г. $V_{\text{бер}}$ становится ~0 м/с, в результате этого апвеллинг медленно затухает и к 11 июня исчезает полностью.

Турецкое побережье Чёрного моря

Сильные апвеллинги в трёх вышеперечисленных районах Чёрного моря отличает высокая степень повторяемости координат места подъёма холодной воды, расположения всего апвеллинга, его поведения. К таким областям с квазистационарными параметрами апвеллингов можно отнести западную и центральную части Турецкого побережья с направлением береговой линии на северо-восток и на восток. Как видно из рис. 2, максимальное значение общего числа апвеллингов за время расширенного лета наблюдалось в 1998, 2000, 2003, 2007 и 2009 гг. Так, 2003 г. выделяется необычно высокой активностью явления, в этом районе наблюдался абсолютный максимум общей длительности апвеллингов, процесс проявлялся на морской поверхности в течение 116 дней из 124 дней мониторинга. 1999, 2001 и 2002 гг. являлись годами пониженной активности. Типичный вид развитого апвеллинга в данном районе за 23 июля 2015 г. представлен в левой части рис. 7. Процесс поднятия холодной воды под воздействием ветра начался 21 июля. Перепад температур ΔT составлял 11,5 °C, минимальное значение поднятой на поверхность воды $T_{\min} = +13,5$ °C, максимальное значение окружающей апвеллинг воды $T_{\max} = +25$ °C. Возникновение апвеллинга часто сопровождается увеличением концентрации хлорофилла а (правая часть рис. 7). Однако сказать однозначно, вызвано ли регистрируемое увеличение концентрации хлорофилла подъёмом из глубины биогенов и развитием фитопланктона или просто подъёмом фитопланктона из подповерхностного слоя максимума (Finenko et al., 2005), не является возможным.



Рис. 7. Температура поверхности океана и концентрация хлорофилла *а* в зоне апвеллинга у побережья Турции 23 июля 2015 г.

Юго-западное побережье Крыма

Данная область имеет различные направления береговой линии, в результате чего апвеллинги образуются не всегда одновременно по всему району. Область N2 фактически можно разбить на две части с различным направлением береговой линии: северную и южную. Северная часть более активна по частоте, мощности и длительности явления. Апвеллинги в южной части области N2 довольно редки, наиболее характерная картина развития события на севере дана на *рис. 8a* (см. с. 203). Как правило, при затухании апвеллинга холодная вода уходит от берега на юг.



Рис. 8. Спутниковое изображение апвеллингов в Крыму в 19:07 12 июня 2005 г. (*a*); поле ветра над Чёрным морем на 00:00 12 июня 2005 г. по данным MERRA (*б*)

В силу некоторой параллельности береговой линии областей N1 и N2 (её северной части), их несильной отдалённости (~140 км) здесь часто наблюдается определённая квазисинхронность времени проявления, существования и степени активности апвеллингов (*puc. 9a*). Такая же временная связь у подъёма холодных вод в данных районах может существовать с подобным процессом у Тендровской косы.



Рис. 9. Поле поверхностной температуры 1 июля 2015 г., апвеллинги в областях N1, N2 и N6 (*a*); поле ветра 27 июня 2015 г. (*б*); поле ветра 28 июня 2015 г. (*в*)

Типичные ветровые условия, способствующие возникновению апвеллинга

В качестве примера зависимости развития апвеллинга от ветра на *рис. 8a* представлено спутниковое изображение за 12 июня 2005 г. двух районов N1 и N2 с типичными для ЮБК и южного берега Тарханкута проявлениями апвеллинга. Усреднённая береговая линия этих двух участков направлена с запада на восток. Апвеллинг длился 5 дней — с 11 по 14 июня. Максимум подъёма холодной воды наблюдался примерно через 19 ч достижения максимума вдольбереговой составляющей ветра V_{6ep} . Он пришёлся на 19:00 12 июня и продолжался до раннего утра 13 июня. В 12:00 11 июня в этих двух районах вдольбереговая составляющая ветра V_{6ep} . Он пришёлся на 19:00 12 июня и продолжался до раннего утра 13 июня. В 12:00 11 июня в этих двух районах вдольбереговая составляющая ветра V_{6ep} в районе ЮБК возросла до 7 м/с, а под Тарханкутом она составляла 7–8 м/с. На ЮБК максимум V_{6ep} наблюдался в 06:00 12 июня, а под Тарханкутом — в 12:00. На *рис. 86* представлено поле ветра на 00:00 12 июня. К 18:00 V_{6ep} упала до 5 м/с, а 13 июня в 06:00 V_{6ep} была около 0 м/с. На ЮБК апвеллинг практически исчез к 08:00, в районе 2 — к вечеру 14 июня.

На рис. 9а представлено спутниковое изображение за 1 июля 2015 г., на котором видны три мощных развитых апвеллинга: на ЮБК, юго-западном побережье Крыма и Тендровской косе. На ЮБК апвеллинг существовал с 18 июня по 3 июля, на юго-западной части Крыма с 19 июня по 9 июля, на Тендровсой косе — с 21 июня по 7 июля. По шкале, находящейся слева от изображения, можно оценить взаимное пространственное расположение более тёплых и холодных вод на поверхности моря (температуру поверхности моря) на Южном берегу Крыма. Белые части изображения апвеллинга соответствуют поверхностной температуре <15 °C. На данном рисунке видны множество холодных струй, которые веером расходятся от берега. В наиболее типичном проявлении наблюдаются одна-две струи, которые распространяются на юг или на юго-запад. По мере развития апвеллинга либо струя отрывается от берега, либо апвеллинг затухает. На рисунке также хорошо видны мощные подъёмы холодной воды в юго-западной части Крыма и в районе Тендровской косы с множеством вытянутых на юг струй — филаментов. На рис. 96 и в даны поля ветра 27 и 28 июня. Максимум благоприятного апвеллингу ветра наблюдался 28 и 29 июня. Локальный ветер имел юго-западное направление, и вдольбереговая компонента скорости ветра V_{бер} достигала 7-10 м/с. Максимум апвеллинга наблюдался 30 июня и 1 июля. В этот период времени перепад температур ΔT достигал 10 °C на всех трёх участках.

Форма области апвеллинга не повторяет вдольбереговую полосу, а существенным образом модулируется взаимодействием с мезомасштабными вихревыми образованиями. Направленные к берегу течения уменьшают область подъёма холодных вод, а течения от берега захватывают воды апвеллинга и переносят их на расстояние до 100 км. Область подъёма холодных вод в некоторых районах может иметь ширину до 60–80 км, значительно превышая бароклинный радиус деформации Россби.

Сопоставление события апвеллинга с ежесуточными данными скорости вдольберегового ветра NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction — Национальный центр экологических прогнозов) было проведено для различных районов Чёрного моря, и везде наблюдалась высокая корреляция между вдольбереговой компонентой ветра и проявлением апвеллинга. В большинстве случаев ветры с вдольбереговой компонентой $V_{6ep} > 5$ м/с вызывали понижение температуры поверхностного слоя в прибрежной зоне.

Заключение

Анализ проявления прибрежных апвеллингов в тёплый период для Чёрного моря позволил выделить районы с наиболее часто встречающимися изучаемыми явлениями. Отмечена существенная межгодовая изменчивость общей длительности апвеллингов в рассматриваемый период. Выделяется двух-трёхлетняя периодичность в общей длительности апвеллингов для ряда районов. Общая площадь поверхности, занимаемая водами апвеллинга, может достигать

12-14% от всей площади Чёрного моря. Минимальные температуры в апвеллингах составляют 8-9 °C, что говорит о подъёме вод нижней границы сезонного термоклина. При ослаблении ветра, вызвавшего апвеллинг, поднявшиеся воды термоклина после интенсивного газои теплообмена с атмосферой опускаются на соответствующий изопикнический уровень, осуществляя вентиляцию термоклина. Таким образом, апвеллинги являются своеобразными окнами для обмена вод термоклина и подтермоклинных вод с атмосферой в тёплый период года. Усиление ветра, вызывающего апвеллинг, интенсифицирует и процессы газообмена на границе раздела «море – атмосфера». Таким образом, максимальный обмен происходит именно в период существования апвеллинга. В ряде случаев области холодных вод отрываются от берега и перемещаются в центральную часть моря. Возможная причина сохранения вод апвеллинга в поверхностном слое — их распреснение. Неустойчивость апвеллингового фронта реализуется в ряде случаев в виде вытянутых от берега струй (филаментов).

Анализ изменчивости средней завихренности поля ветра над Чёрным морем выявил изменение особенностей годового хода этого параметра в 2003–2004 гг., что привело к генерации аномально большого количества апвеллингов в 2003 г. Так, вдоль Анатолийского побережья апвеллинг наблюдался в течение 116 дней из анализируемого интервала в 124 дня. Совместный анализ карт концентрации хлорофилла и температуры поверхности не позволил выявить однозначную связь между этими параметрами. Наблюдались ситуации как с повышением концентрации хлорофилла в зоне апвеллинга, так и с понижением.

Литература

- 1. *Богданова А. К., Кропачев Л. Н.* Сгонно-нагонная циркуляция и ее роль в гидрологическом режиме Черного моря // Метеорология и гидрология. 1959. № 4. С. 26–32.
- Боровская Р.В., Боровская К.В. Роль апвеллинга в рекреационной деятельности Крыма // Тр. Южного научно-исслед. ин-та рыбного хоз-ва и океанографии. Керчь: Изд-во «Керченский филиал («ЮгНИРО») федерального гос. бюджет. науч. учреждения «Азовский научно-исслед. ин-т рыбного хоз-ва», 2015. Т. 53. С. 19–28.
- 3. Боровская Р.В., Панов Б. Н., Спиридонова Е. О., Лексикова Л.А., Кириллова М. В. Прибрежный черноморский апвеллинг и межгодовая изменчивость его интенсивности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2005. Вып. 12. С. 42–48.
- 4. *Гинзбург А. И.* Процессы горизонтального обмена в приповерхностном слое Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 2. С. 75–83.
- 5. *Гинзбург А. И.* О нестационарных струйных течениях в юго-западной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 10–16.
- 6. *Гинзбург А. И.*, *Федоров К. Н.* Система поперечных струй в прибрежных апвеллингах: спутниковая информация и физические гипотезы // Исслед. Земли из космоса. 1985. № 1. С. 3–10.
- 7. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Соловьев Д. М., Станичный С. В. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 6. С. 66–72.
- 8. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Соловьев Д. М., Станичный С. В.* Циклонические вихри апвеллингового происхождения у юго-западной оконечности Крыма // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 83–88.
- 9. *Гришин Г.А.* Спутниковые и судовые наблюдения гидрологических фронтов Черного и Средиземного морей // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 5. С. 76–88.
- 10. Джиганшин Г. Ф., Полонский А. Б., Музылева М.А. Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в конце летнего сезона и его причины // Морской гидрофиз. журн. 2010. № 4. С. 45–57.
- 11. *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.
- 12. Зацепин А. Г., Сильвестрова К. П., Куклев С. Б., Пиотух В. Б., Подымов О. И. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 203–214.
- 13. *Коснырев В. К., Михайлова Э. Н., Станичный С. В.* Апвеллинг в Черном море по результатам численных экспериментов и спутниковым данным // Морской гидрофизич. журн. 1996. № 5. С. 34–46.
- 14. Костяной А. Г., Структурообразующие процессы в апвеллинговых зонах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. 2000. 317 с.

- 15. *Михайлова Э. Н., Музылева М.А., Полонский А.Б., Соловьев Д. М., Станичный С.В.* Пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма в 2005–2008 гг. // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. С. 318–321.
- 16. Полонский А.Б., Музылева М.А. Современная пространственно-временная изменчивость апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма // Морской гидрофиз. журн. 2016. № 4. С. 96–108.
- 17. 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.
- 18. Сорокин Ю. И. Черное море: природа, ресурсы. М.: Наука, 1982. 217 с.
- 19. *Толмазин Д. М.* Сгонные явления в северо-западной части Черного моря // Океанология. 1963. Т. 3. № 5. С. 848–852.
- 20. *Finenko Z. Z.*, *Churilova T. Ya.*, *Lee R. I.* Dynamics of the vertical distributions of chlorophyll and phytoplankton biomass in the Black Sea // Oceanology. 2005. V. 45. No. 1. P. 112–126.
- Gawarkiewicz G., Korotaev G., Stanichny S., Repetin L., Soloviev D. Synoptic upwelling and cross-shelf transport processes along the Crimean coast of the Black Sea // Continental Shelf Research. 1999. V. 19. No. 8. P. 977–1005.
- Oguz T., La Violette P.E., Unluata U. The upper layer circulation of the Black Sea: its variability as inferred from hydrographic and satellite observations // J. Geophysical Research. 1992. V. 97. Iss. C8. P. 12569–12584.
- 23. *Sur H. I., Ozsoy E., Unluata U.* Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // Progress in Oceanography. 1994. V. 33. P. 249–302.

Black Sea upwellings

R. R. Stanichnaya, S. V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mails: rrsta@mail.ru, sstanichny@mail.ru

The paper considers the statistical characteristics of manifestation of coastal upwellings in the Black Sea based on the analysis of satellite data on the sea surface temperature for the period from 1997 to 2011, for the South Coast of Crimea to 2015. Areas with the most frequent upwellings during the extended summer period from May 15 to September 15 are identified. A significant interannual variability in the number of upwellings is shown, as well as a quasi-biennial periodicity. For a number of selected areas, spatial features of upwelling manifestations were considered and quantitative parameters were estimated — alongshore length of upwelling, occupied area on the sea surface, temperature difference between upwelling waters and undisturbed surrounding waters. It is known that the main reason for the occurrence of coastal upwelling is an increase in the favorable alongshore component of the wind speed direction. A joint analysis of maps of chlorophyll concentration and surface temperature failed to reveal unambiguous relationship between these parameters. Situations were observed both with an increase in chlorophyll concentration in the upwelling zone and with a decrease.

Keywords: upwelling, remote sensing, Black Sea, alongshore wind, sea surface, geostrophic component, deep waters

Accepted: 01.07.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207

References

1. Bogdanova A. K., Kropachev L. N., Wind-induced circulation and its role in the hydrological mode of the Black Sea, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1959, No. 4, pp. 26–32 (in Russian).

- 2. Borovskaya R. V., Borovskaya K. V., The role of upwelling in reactivation activity of the Crimea, *Trudy Yuzhnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo khozyaistva i okeanografii*, 2015, Vol. 53, pp. 19–28 (in Russian).
- 3. Borovskaya R. V., Panov B. N., Spiridonova E. O., Leksikova L. A., Kirillova M. V., Black Sea Near-Coastal upwelling and interannual variability of its intensity, *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2005, Issue 12, pp. 42–48 (in Russian).
- 4. Ginzburg A. I., Horizontal exchange processes in the near-surface layer of the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1994, No. 2, pp. 75–83 (in Russian).
- 5. Ginzburg A. I., On unsteady jet streams in the southwestern part of the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1995, No. 4, pp. 10–16 (in Russian).
- 6. Ginzburg A. I., Fedorov K. N., Cross-jet system in coastal upwelling: satellite <u>information</u> and physical hypotheses, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1985, No. 1, pp. 3–10 (in Russian).
- 7. Ginzburg A. I., Kostyanoy A. G., Solov'yev D. M., Stanichnyy S. V., Coastal upwelling in the northwestern part of the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1997, No. 6, pp. 66–72 (in Russian).
- 8. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Soloviev D. M., Stanichny S. V., Cyclonic eddies of upwelling origin near the southwestern tip of Crimea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 3, pp. 83–88 (in Russian).
- 9. Grishin G.A., Satellite and in situ observations of the hydrological fronts of the Black and Mediterranean Seas, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1993, No. 5, pp. 76–88 (in Russian).
- 10. Dzhiganshin G. F., Polonskiy A. B., Muzyleva M. A., Upwelling in the north-western part of the Black Sea at the end of the summer season and its causes, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2010, No. 4, pp. 45–57 (in Russian).
- 11. Divinsky B.V., Kuklev S.B., Zatsepin A.G., Numerical simulation of an intensive upwelling event in the northeastern part of the Black Sea at the IO RAS hydrophysical testing site, *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 5, pp. 615–620 (in Russian).
- 12. Zatsepin A. G., Sil'vestrova K. P., Kuklev S. B., Piotukh V. B., Podymov O. I., Observation of the cycle of intense coastal upwelling and downwelling at the research site of the Shirshov Institute of Oceanology in the Black Sea, *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 188–199 (in Russian).
- 13. Kosnyrev V.K., Mikhaylova E.N., Stanichny S.V., Upwelling in the Black Sea based on the results of numerical experiments and satellite data, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 1996, No. 5, pp. 34–46 (in Russian).
- 14. Kostyanoy A.G., *Strukturoobrazuyushchie protsessy v apvellingovykh zonakh: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (Structural processes in upwelling zones, Dr. phyz. math. sci. thesis), 2000, 317 p.
- 15. Mikhaylova E. N., Muzyleva M. A., Polonskiy A. B., Solov'yev D. M., Stanichny S. V., Spatial-temporal variability of upwelling characteristics in the northwestern part of the Black Sea and off the coast Crimea in 2005–2008, *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, 2009, pp. 318–321 (in Russian).
- 16. Polonskiy A. B., Muzyleva M. A., Modern spatio-temporal variability of upwelling in the north-western part of the Black Sea and the coast of the Crimea, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2016, No. 4, pp. 96–108 (in Russian).
- 17. Silvestrova K. P., Zatsepin A. G., Myslenkov S. A., Coastal upwelling in the Gelendzhik area of the Black Sea: effect of wind and dynamics, *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 4, pp. 469–477 (in Russian).
- 18. Sorokin Yu. I., *The Black Sea*, *Ecology and Oceanography*, Leiden, Biology of Inland Waters Series, The Netherlands: Backhuys Publishers, 2002, 875 p.
- 19. Tolmazin D. M., Drift phenomena in the northwestern part of the Black Sea), *Okeanologiya*, 1963, Vol. 3, No. 5, pp. 848–852 (in Russian).
- 20. Finenko Z. Z., Churilova T. Ya., Lee R. I., Dynamics of the vertical distributions of chlorophyll and phytoplankton biomass in the Black Sea, *Oceanology*, 2005, Vol. 45, No. 1, pp. 112–126.
- Gawarkiewicz G., Korotaev G., Stanichny S., Repetin L., Soloviev D., Synoptic upwelling and cross-shelf transport processes along the Crimean coast of the Black Sea, *Continental Shelf Research*, 1999, Vol. 19, No. 8, pp. 977–1005.
- Oguz T., La Violette P. E., Unluata U., The upper layer circulation of the Black Sea: its variability as inferred from hydrographic and satellite observations, *J. Geophysical Research*, 1992, Vol. 97, Issue C8, pp. 12569–12584.
- 23. Sur H. I., Ozsoy E., Unluata U., Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea, *Progress in Oceanography*, 1994, Vol. 33, pp. 249–302.