

П.Д.Ломакин*, М.А.Попов**,
Е.А.Куфтаркова**, Н.П.Ковригина**

**Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

***Институт биологии южных морей НАН Украины, г.Севастополь*

ПРОЯВЛЕНИЕ АПВЕЛЛИНГА В ПОЛЯХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА АКВАТОРИИ БАЛАКЛАВСКОЙ БУХТЫ

На основе массива эмпирических данных, накопленных в Институте биологии южных морей НАН Украины в ходе выполнения мониторинговых океанологических исследований, выявлены закономерности проявления апвеллинга в термохалинном поле и в полях основных гидрохимических элементов на акватории Балаклавской бухты и смежного с ней участка моря. Оценено влияние апвеллинга как природного фактора среды, способствующего повышению качества вод рассматриваемой акватории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *апвеллинг, термохалинные поля, гидрохимические показатели, Балаклавская бухта, Черное море.*

В океанографической литературе, посвященной Балаклавской бухте (см., например, [1 – 3]), можно найти описание достаточного количества фактов, свидетельствующих о значительном влиянии апвеллинга на температуру воды. Известно, что развитый апвеллинг способствует проникновению в бухту подповерхностных вод с глубины 50 – 80 м, что сопровождается резким падением температуры воды. В течение апвеллингового цикла в бухте зафиксированы колебания температуры с размахом до 6 – 8 °С. Вместе с тем, до настоящего времени, ввиду отсутствия более или менее детальных съемок непосредственно во время апвеллинга, не существует представления о том, как деформируется трехмерное термохалинное поле в бухте под воздействием этого явления. Малочисленны также сведения о влиянии апвеллинга на рассматриваемой акватории на поля элементов гидрохимического комплекса.

Цель настоящей статьи – выявить закономерности проявления апвеллинга в термохалинном поле и в полях основных гидрохимических элементов на акватории Балаклавской бухты. На количественном уровне оценить влияния апвеллинга, как природного фактора, способствующего повышению качества вод.

Материал и методика исследований. Задача по изучению закономерностей трансформирующейся под влиянием апвеллинга трехмерной структуры полей гидрофизических и гидрохимических элементов в Балаклавской бухте предполагалась в рамках мониторинговых исследований, которые ведутся специалистами отдела марикультуры и прикладной океанологии Института биологии южных морей (ИнБЮМ) НАН Украины за время 1991 – 1993 и 2000 – 2010 гг. Схема станций, по которой выполнялись экспериментальные работы, представлена на рис.1.

При планировании подобных экспедиций ориентировались на краткосрочный прогноз погоды, ожидая ветры северной или западной четверти, вы-

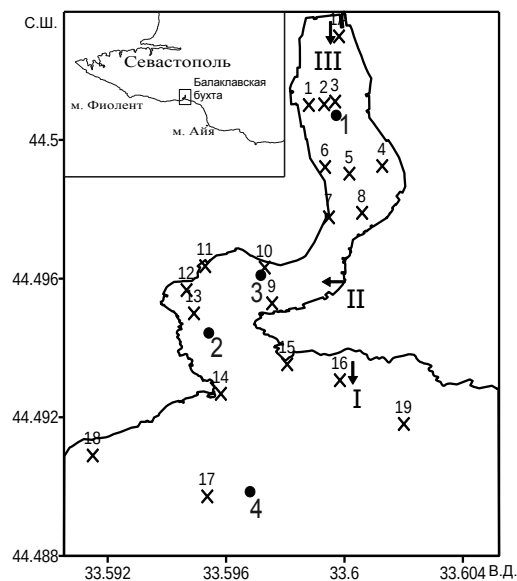


Рис. 1. Схема станций экологического мониторинга и источников загрязнения Балаклавской бухты: ● – гидрохимические станции, × – CTD-зондирования, I – выпуск сточных вод г. Балаклава, II – ливневой сток, III – речной сток.

зывающие сгон и локальный апвеллинг в бухте. Как оказалось на практике, выполнить съемку, сроки которой могли совпасть с интервалом времени ожидаемого апвеллинга и, которая отразила бы ситуацию его полного цикла, крайне сложно.

В течение последних 10 лет нам удалось зафиксировать четыре случая апвеллинга в Балаклавской бухте: 24 июля 2000 г., 18 июня 2003 г., 23 июня 2005 г. и 22 июня 2007 г. Причем первые три съемки, представляли собой наблюдения на станциях, расположенных вдоль осевой линии бухты и касались различных фаз и короткого промежутка времени (3 – 4 ч) каждого апвеллингового цикла. Лишь четвертая съемка оказалась наиболее удачной. Попытка ее реализации была предпринята 22 июня 2007 г. Начало экспериментальных исследований планировалось по прогнозу погоды, – ожиданию сгонного северного ветра.

Эксперимент был организован следующим образом. С целью оценки фоновой ситуации, на которой мог развиваться ожидаемый по прогнозу погоды сгонный апвеллинг, в дневные часы 20 июня при маловетрии была выполнена детальная CTD-съемка акватории бухты и смежного с ней участка открытого моря. Измерения проводились при помощи зонда «ОЛД» по схеме, включившей 19 станций с шагом по глубине 0,25 м (рис. 1). В результате была зафиксирована предшествующая апвеллингу ситуация, отражавшая основные признаки фоновое состояние трехмерной термохалинной структуры вод.

Повторная аналогичная съемка была начата утром 22 июня 2007 г. Ночью с 21 на 22 июня в районе бухты, согласно оправдавшемуся прогнозу погоды, наблюдался ветер северной четверти скоростью 8 – 10 м/с. В первые часы съемки преобладал слабый северный ветер, далее установился штиль, в заключительной ее стадии превалировал слабый юго-западный атмосферный перенос. Зафиксированная съемкой ситуация соответствовала завершающей фазе апвеллинга, вызванного локальным сгонным северным ветром.

Отметим, что по результатам данной съемки впервые за всю историю экспериментальных океанологических исследований Балаклавской бухты были получены представления о трехмерной структуре термохалинного поля вод всей ее акватории в условиях апвеллинга.

Для оценки интервалов времени, необходимых для очистки под влиянием апвеллинга акватории Балаклавской бухты биогенами антропогенного происхождения, использованы методические приемы, заимствованные из [4, 5]. Гидрохимические анализы выполнены в аккредитованной гидрохимической

лаборатории ИнБИОМ согласно общепринятым методам [6].

Обсуждение результатов. Рассмотрим особенности структуры термохалинного поля в бухте до и после апвеллинговой ситуации, используя результаты съемок 20 и 22 июня 2007 г.

Вертикальная стратификация термохалинного поля в предшествовавших апвеллингу условиях (рис.2, а, б), была типичной для ситуации, наблюдаемой, обычно, летом в Балаклавской бухте, а также на смежных с нею участках крымского черноморского побережья [7 – 9].

Вертикальная стратификация полей температуры и солёности характеризовалась наличием отчетливо выраженного верхнего квазиоднородного слоя толщиной 5 – 20 м с T , S -индексами 19,8 – 20,7 °C и 17,6 – 17,9 ‰. Глубже, в мористой части бухты, примерно, между горизонтами 15 и 25 м, как в поле температуры, так и в поле солёности, располагался слой скачка, вертикальный градиент в котором $\sim -0,8$ °C/м и $\sim +0,03$ ‰/м. Подстилавшие скачек воды (слой 25 – 60 м) отличались однородностью. Диапазон абсолютных изменений температуры и солёности здесь равнялся, соответственно, 10 – 12 °C и 18,2 – 18,3 ‰ (рис.2, а, б).

Под влиянием апвеллинга в термохалинном поле Балаклавской бухты произошли не только заметные количественные, но и качественные изменения, отразившиеся на всех его структурных элементах: верхнем квазиоднородном слое, слое скачка, в придонной области (рис.2).

Апвеллинг 22 июня 2007 г. сопровождался следующими явлениями. Подповерхностные черноморские воды распространились на всю акваторию Балаклавской бухты. Наиболее ярко их влияние на структуру термохалинного поля было выражено на юге кутовой части (между ст.5 и 10, рис.2 – 4).

Практически повсеместно исчез верхний квазиоднородный слой. В кутовой части бухты температура толщи вод уменьшилась примерно на 4 °C и

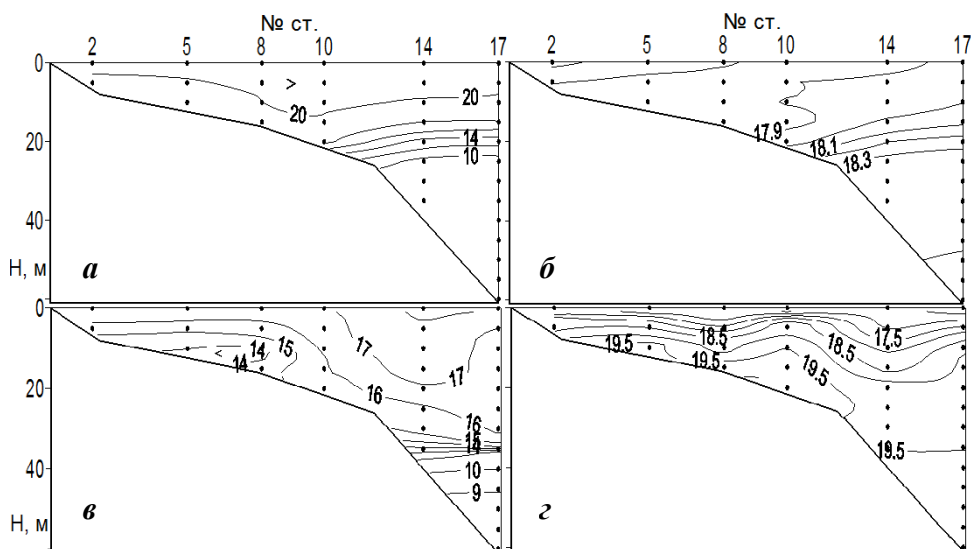
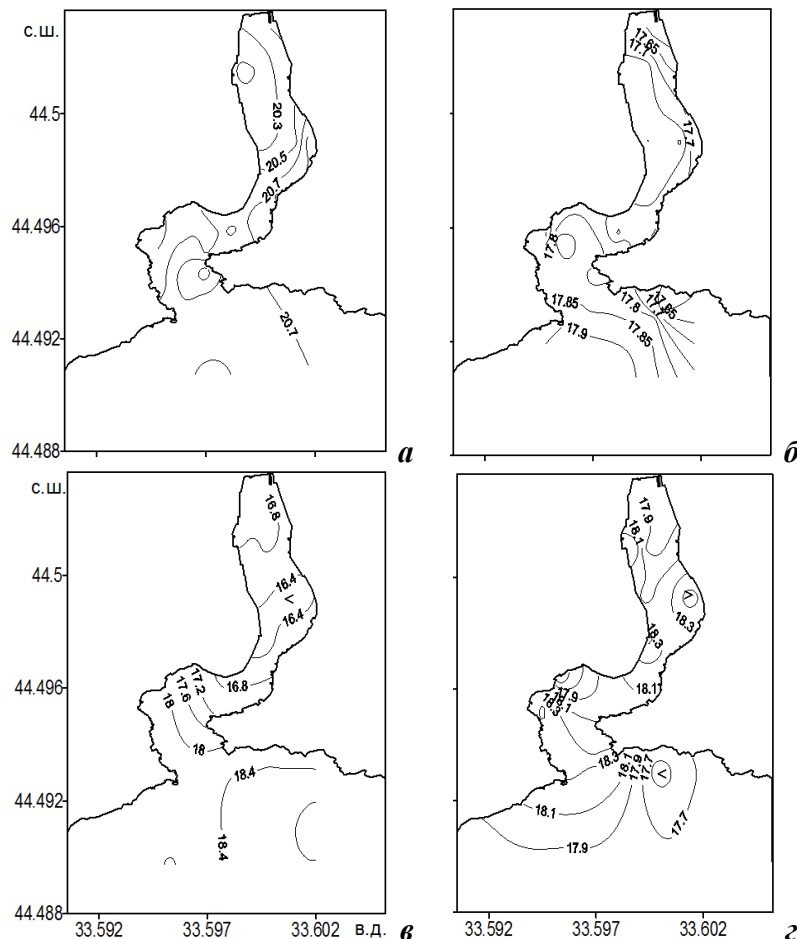


Рис. 2. Распределение термохалинных параметров на разрезе через осевую часть Балаклавской бухты: температура, °C (а, в); солёность, ‰ (б, г) 20 июня 2007 г. до апвеллинга (а, б) и 22 июня 2007 г. во время апвеллинга (в, г).

на $2,5^{\circ}\text{C}$ на поверхности в ее открытой области. Соленость на поверхности в кутовой части выросла на $0,3 - 0,5\text{‰}$.

В полях обеих анализируемых величин трансформировался слой скачка. Максимальный вертикальный градиент температуры и солености сместился в другой диапазон T, S -индексов. В поле температуры, в кутовой части и в глубоководной области бухты сформировались отдельные прослойки максимального вертикального градиента. В глубоководной части вертикальный градиент температуры в скачке резко обострился и достиг значения $-1,4^{\circ}\text{C}/\text{м}$ (рис.2, в). В поле солености слой скачка сместился в верхний $10 - 15$ метровый слой вод (рис.2, г).

В подповерхностных и, особенно, в придонных водах бухты возникли фронтальные образования с поперечным масштабом в несколько сотен метров. На участках активного взаимодействия апвеллинговых и местных вод горизонтальный градиент температуры и солености в локальных фронталь-

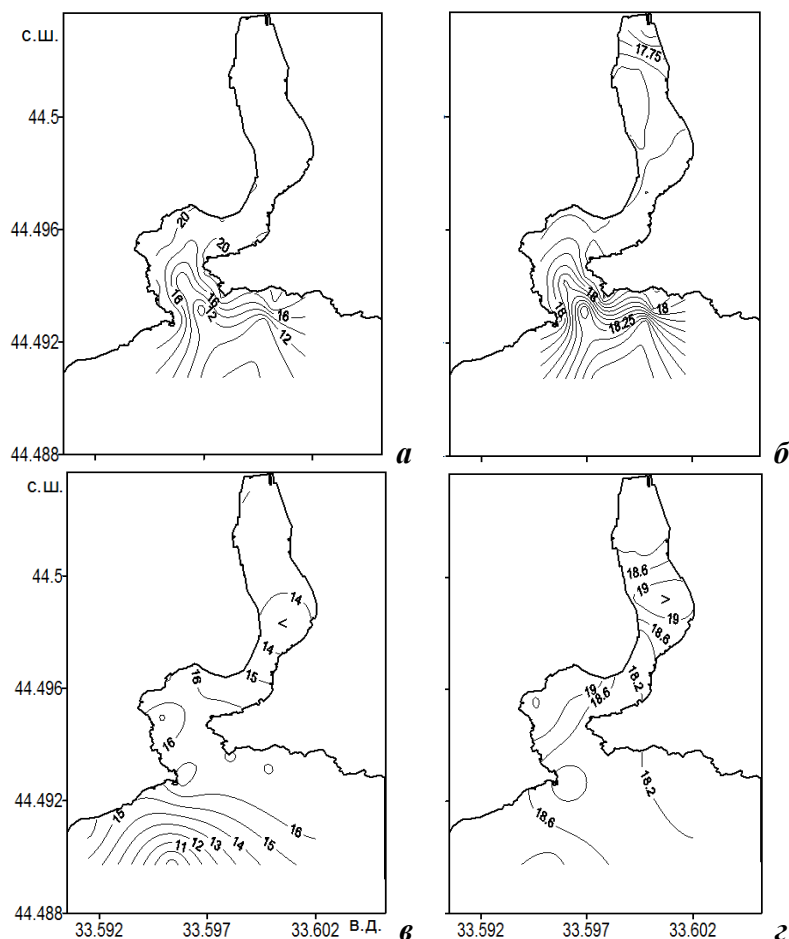


Р и с . 3 . Распределение термохалинных параметров на поверхности Балаклавской бухты: температура, $^{\circ}\text{C}$ (а, в); соленость, ‰ (б, г) 20 июня 2007 г. до апвеллинга (а, б) и 22 июня 2007 г во время апвеллинга (в, г).

ных разделах достиг $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ и $0,1 - 0,3\text{ }‰/100\text{ м}$. В придонном слое температура в кутовой части Балаклавской бухты снизилась на $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и на $3 - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в открытой ее области. Соленость у дна повсеместно повысилась примерно на $0,1 - 0,5\text{ }‰$ (рис.4).

Судя по T, S -индексам и значениям рН апвеллинговых вод, глубина, с которой 22 июня 2007 г. поднялись воды промежуточной черноморской водной массы в Балаклавскую бухту, по нашим подсчетам оценивается примерно в 60 м. Согласно литературным сведениям [1 – 3], при развитом апвеллинге в бухту проникают подповерхностные черноморские воды с глубины 50 – 80 м.

Анализ гидрохимического материала, полученного нами в ходе мониторинга рассматриваемой акватории, показал, что наиболее загрязнена ее мелководная часть, принимающая сточные и ливневые воды. Здесь обнаружено заметное превышение предельно-допустимых концентраций отдельных гидрохими-



Р и с . 4 . Распределение термохалинных параметров у дна Балаклавской бухты: температура, $^{\circ}\text{C}$ (а, в); соленость, $‰$ (б, г) 20 июня 2007 г. до апвеллинга (а, б) и 22 июня 2007 г. во время апвеллинга (в, г).

ческих показателей. Интенсивная антропогенная нагрузка и слабый водообмен способствуют аккумуляции загрязняющих веществ на этом участке бухты.

Несмотря на то, что сгонно-нагонные явления носят непериодический характер, они играют важную роль в формировании гидрохимического режима исследуемой акватории. Как показали результаты анализа имеющейся в нашем распоряжении информации, поступление в систему апвеллинговой циркуляции подповерхностных черноморских вод на акваторию бухты сопровождается существенными изменениями пространственно-временных параметров гидрохимической структуры в ходе апвеллинговых циклов. Знание сущности этих явлений и их изучение необходимо, прежде всего, чтобы отделить природные процессы и факторы от антропогенных.

Так, например, природные незагрязненные подповерхностные воды, которые поступают в бухту при апвеллинге и взаимодействующие с ними местные загрязненные воды, имеют ряд сходных гидрохимических признаков. В частности, для них типичны повышенные концентрации биогенных веществ (PO_4 , NO_3 , NH_4 , SiO_3), пониженные значения pH и содержания растворенного кислорода. По этому набору показателей апвеллинг формально может быть расценен, как фактор загрязнения. Вместе с тем, известно, что для вод, подверженных антропогенной нагрузке, кроме указанных выше свойств, характерны повышенные концентрации органических веществ: БПК₅, окисляемости, $P_{орг.}$, $N_{орг.}$, а также высокое бактериальное и техногенное загрязнение.

Гидрохимический режим на акватории Балаклавской бухты формируется в тесной взаимосвязи с антропогенным влиянием, динамикой вод и природно-климатическими условиями (речной сток, осадки, талые воды). По данным Государственного управления по экологической безопасности и охране природной среды г.Севастополя [10] объем поступающих в Балаклавскую бухту неочищенных сточных вод – около 4,4 млн. м³/год.

Поверхностно-склоновые и хозяйственно-бытовые сточные воды, попадающие в мелководную часть бухты, создают опасную экологическую ситуацию. Так, пробы морской воды, отобранные нами после дождя в мелководной части бухты 9 апреля 2001 г. и 21 апреля 2003 г. имели все явные признаки загрязнения ливневым стоком. Они отличались пониженными значениями солености (17,29 и 17,02 ‰), а также pH (8,11 и 8,23), повышенными концентрациями нитратного азота (1072 и 810 мкг/л соответственно), в апреле 2003 г. и органического азота (949 мкг/л).

В феврале – марте 2006 г. после обильных снегопадов наблюдалось поступление талых вод в бухту, что привело к значительному распреснению вод в кутовой мелководной ее части до 16,69 ‰, увеличению концентрации нитратного азота (1222 мкг/л) и понижению pH (до 8,17). В центральной части бухты в это время также были отмечены пониженные значения солености (до 16,86 ‰), относительного содержания кислорода (92,9 ‰), величины pH (8,16) и повышенные значения нитратного (1260 мкг/л), аммонийного азота (30,6 мкг/л) и кремния (366 мкг/л). Загрязнение кутовой части бухты и ее распреснение обусловлено также поступлением в это время речных вод со стоком р.Балаклава. В глубоководной части бухты, вследствие лучшего водообмена с прилегающей акваторией моря, признаки трансформированных речных и талых вод менее выражены, по сравнению с ее мелководной областью.

В исследуемый период в мелководной части бухты содержание силикатов в верхнем слое, как правило, в 2 – 3 раза превышало их содержание у дна, что противоречит классическому распределению в незагрязненных морских водах, когда с глубиной концентрация силикатов возрастает. Это свидетельствует о загрязнении верхнего слоя Балаклавской бухты стоками различного происхождения. К примеру, в апреле 2003 г., содержание силикатов, зафиксированное нами непосредственно в ливневом стоке, оказалось чрезвычайно высоким, до 2249 мкг/л. Максимальные концентрации силикатов, от 1090 мкг/л в мелководной части бухты до 1372 мкг/л в ее центральной области, наблюдались в 2004 – 2005 гг., когда в Балаклавской бухте проводились дноочистительные работы.

Анализ накопленной эмпирической информации показал, что апвеллинг, вызывающий адвекцию подповерхностных черноморских вод в Балаклавскую бухту, – один из значимых факторов, способствующих существенному улучшению экологической ситуации.

В табл.1 представлен комплекс гидрохимических показателей среды, полученный нами по данным четырех съемок, выполненных в разное время и на различных фазах апвеллинга.

24 июля 2000 г. наблюдения были проведены на начальной фазе апвеллинга, и, поэтому, подповерхностная вода с пониженными значениями температуры, pH и повышенной концентрацией фосфатов и силикатов обнаруживалась в бухте только в придонном слое. Так, в мелководном районе (ст.1) на глубине 7 м значение pH на поверхности равнялось 8,08 и 8,18 – у дна. В центральной части бухты (ст.2) были зафиксированы значения pH на поверхности 8,15 и 8,01 – на глубине 10 м. Поступившая в придонный слой бухты вода по собственным признакам pH характерна для глубин 50 – 70 м смежной с Балаклавской бухтой части Черного моря.

18 июня 2003 г. в придонном слое кутовой части бухты подповерхностная вода, проникающая с открытой части моря регистрировалась по повышенным значениям солености (18,30 ‰). В это время в центральной части бухты на глубине 10 м также была обнаружена вода с характерными для подповерхностных черноморских вод признаками: пониженные значения температуры (8,7 °C), pH (8,11) и относительного содержания кислорода (75,70 %) и повышенная концентрация фосфатов (133,7 мкг/л).

23 июня 2005 г. проникшие в бухту в системе апвеллинга подповерхностные воды были обнаружены во всей толще вод бухты. Они характеризовались низкой температурой (8,7 – 11,1 °C), повышенной соленостью (18,05 – 18,19 ‰), низкими значениями pH (8,09 – 8,11), повышенными величинами фосфатов и кремнекислоты.

22 июня 2007 г. поступившие в подповерхностный слой бухты морские воды со смежной части моря имели повышенные значения солености, пониженные значения температуры и растворенного кислорода. По содержанию биогенных элементов (NO_3 , NH_4 , PO_4 , Si) и значениям pH, поступившая в бухту морская вода была чище, чем поверхностная вода собственно бухты. Максимальная разница в значениях гидрохимических показателей между верхним и подстилавшим его слоем наблюдалась в районе ст.1 (табл.1).

Т а б л и ц а 1. Гидрохимические показатели в Балаклавской бухте, типичные для апвеллинговой ситуации.

показатели	ст. 1	ст. 2	ст. 3	ст. 4	ст. 1	ст. 2	ст. 3	ст. 4
	поверхность				подповерхностный слой*			
24 июля 2000 г.								
$T, ^\circ\text{C}$	21,8	21,0	20,7	29,0	9,4	8,8	8,7	8,8
$S, \text{‰}$	17,72	17,79	17,72	17,85	–	–	–	–
$O_2, \text{‰}$	112,5	108,2	108,2	108,9	–	–	–	–
pH	8,18	8,15	8,20	7,96	8,08	8,01	7,81	8,17
БПК ₅ , мг/л	3,36	2,26	3,43	1,83	–	–	–	–
NO_2 , мкг/л	2,2	2,9	2,5	1,7	2,7	1,4	1,2	0,9
NO_3 , мкг/л	138,5	63/1	47,2	9,7	9,3	3,6	7,6	2,1
PO_4 , мкг/л	34,6	0,7	315,3	36,4	41,6	133,4	38,8	0,0
Si , мкг/л	378	256	1290	384	491	352	185	165
18 июня 2003 г.								
$T, ^\circ\text{C}$	13,8	12,7	13,6	12,6	10,5	8,7	9,1	8,5
$S, \text{‰}$	17,10	17,80	18,00	17,50	18,30	17,90	17,80	17,80
$O_2, \text{‰}$	104,3	102,2	102,8	108,3	93,0	75,7	94,0	96,6
pH	8,27	8,28	8,28	8,30	8,26	8,11	8,26	8,27
БПК ₅ , мг/л	3,4	0,9	0,8	0,4	1,5	0,0	0,5	0,2
NO_2 , мкг/л	605,9	153,7	61,1	4,1	32,7	9,6	9,5	4,8
NO_3 , мкг/л	0,7	4,3	1,4	11,5	1,4	15,8	5,0	2,1
PO_4 , мкг/л	32,6	26,0	16,6	5,5	15,6	133,7	92,5	7,3
Si , мкг/л	426	244	141	131	262	180	196	166
23 июня 2005 г.								
$T, ^\circ\text{C}$	11,1	10,1	9,8	9,4	8,8	8,8	8,8	8,7
$S, \text{‰}$	17,11	18,05	18,07	18,16	18,05	18,17	18,17	18,19
$O_2, \text{‰}$	103,8	105,5	105,1	106,1	96,0	98,5	99,2	96,9
pH	8,09	8,11	8,11	8,12	8,12	8,13	8,12	8,11
БПК ₅ , мг/л	3,2	12,0	5,1	0,3	5,4	1,1	0,7	0,5
NO_2 , мкг/л	358,2	40,0	33,4	10,4	48,8	16,7	14,3	15,9
NO_3 , мкг/л	18,6	22,9	15,0	2,1	2,1	2,1	3,6	1,4
PO_4 , мкг/л	34,0	72,0	46,3	20,6	180,1	28,3	33,4	21,9
Si , мкг/л	266	188	170	163	308	157	149	163
22 июня 2007 г.								
$T, ^\circ\text{C}$	16,2	16,0	16,0	16,6	14,2	13,7	13,9	12,7
$S, \text{‰}$	17,79	17,79	17,78	17,79	17,83	17,87	17,79	17,96
$O_2, \text{‰}$	106,5	103,4	112,9	110,5	98,8	94,2	97,6	89,9
pH	8,15	8,29	–	8,39	8,29	8,45	8,37	8,37
БПК ₅ , мг/л	1,2	1,6	1,1	0,8	1,2	1,0	0,9	1,0
NO_2 , мкг/л	65,3	29,2	39,6	14,1	6,5	15,7	33,3	12,1
NO_3 , мкг/л	26,7	13,3	50,0	6,7	6,7	10,0	50,0	40,0
PO_4 , мкг/л	5,1	7,2	2,3	2,6	3,1	3,1	2,1	2,3
Si , мкг/л	70	45	36	31	33	45	27	24

* ст. 1 – горизонт 7 м, ст. 2 – 4 – горизонт 10 м.

Известно, что апвеллинг – мощный природный механизм, способствующий очищению прибрежных подверженных антропогенной нагрузке вод. Вместе с тем, до настоящего времени не существует каких-либо количественных показателей его эффективности для исследуемого района. Для количественной оценки апвеллинга, как фактора, влияющего на качество вод Балаклавской бухты, мы воспользовались результатами, представленными в [4, 5].

Авторы цитируемых работ проанализировали многолетние массивы комплексных гидрофизических и гидрохимических исследований, которые были проведены ими в экспедициях ИнБЮМ по изучению процессов природного очищения сточных вод у Южного берега Крыма (ЮБК). В результате были выявлены механизмы и отслежены закономерности трансформации во времени концентрации ряда химических соединений в загрязненных водах при их взаимодействии с водами открытой части Черного моря.

В частности, показано следующее. Оценена роль таких факторов самоочищения, как физическое разбавление, деструкция органического вещества и утилизация биогенных соединений. Установлено, что для таких биогенных элементов, как аммонийный (NH_4), нитритный (NO_2), нитратный (NO_3) азот, а также фосфаты (PO_4), в процессе их трансформации вклад физического разбавления в среднем составляет: 65 % в фотическом слое, 87 % в подповерхностных слоях моря, а утилизации 35 и 13 % соответственно. Избыточная концентрация биогенных элементов в загрязненных сточных водах при их взаимодействии с чистыми морскими водами – убывающая экспоненциальная функция времени. Определяемое турбулентной диффузией изменение концентрации каждого из четырех химических соединений (NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4) во времени хорошо аппроксимируется экспонентой, имеющей собственные параметры для каждого биогенного элемента, которые также различаются для фотического и подповерхностного слоев моря.

Исходя из отмеченных выше закономерностей, мы попытались рассчитать интервалы времени, необходимые для выравнивания высоких концентраций биогенных элементов, типичных для загрязненных вод Балаклавской бухты, до концентраций подповерхностных черноморских вод, поступающих в бухту в системе апвеллинговой циркуляции. При этом учитывался только первый значимый фактор – физическое разбавление, обусловленное турбулентной диффузией.

Корректность использования зависимостей из [4, 5] для проведения соответствующих численных оценок основана на непосредственной близости бухты к району ЮБК. Согласно [11], процессы турбулентной диффузии здесь характеризуются сходными параметрами. К тому же течения, наблюдавшиеся сотрудниками ИнБЮМ при выполнении экспериментальных исследований у ЮБК и вызываемые апвеллингом компенсационные течения в Балаклавской бухте, близки по интенсивности. Их скорость – около 30 см/с.

Просчитаны два варианта. Когда воды апвеллинга взаимодействуют с крайне загрязненными водами бухты и в ситуации апвеллинга, когда воды бухты характеризуются средним содержанием гидрохимических показателей. Для этого были организованы соответствующие выборки исходных данных (табл.2, 3).

В табл.2 приведены экстремальные значения концентраций рассматривае-

Т а б л и ц а 2. Экстремальные и средние концентрации гидрохимических элементов в Балаклавской бухте за время наблюдений с 2000 по 2009 гг.

№ ст.	кол-во изм., п	H, м	O ₂ ,		PO ₄ ³⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Si
			мл/л	%					
1	78	0	<u>4,40 – 7,98</u> 6,38	<u>85,3 – 113,4</u> 100,0	<u>2 – 85</u> 15	<u>0 – 25</u> 5	<u>4 – 1385</u> 270	<u>1 – 201</u> 21	<u>7 – 1090</u> 266
2	78	0	<u>4,82 – 7,84</u> 6,46	<u>89,9 – 111,8</u> 101,0	<u>1 – 72</u> 10	<u>0 – 30</u> 3	<u>1 – 1290</u> 153	<u>1 – 136</u> 17	<u>6 – 1372</u> 193
3	78	0	<u>4,83 – 8,01</u> 6,50	<u>85,3 – 116,6</u> 101,5	<u>0 – 315</u> 13	<u>0 – 11</u> 3	<u>0 – 995</u> 104	<u>1 – 59</u> 14	<u>9 – 1290</u> 180
4	78	0	<u>4,89 – 8,09</u> 6,57	<u>86,2 – 120,2</u> 102,9	<u>0 – 63</u> 6	<u>0 – 6</u> 1	<u>0 – 191</u> 18	<u>0 – 212</u> 14	<u>10 – 479</u> 126
1	78	7	<u>4,63 – 8,13</u> 6,47	<u>89,7 – 116,6</u> 99,9	<u>0 – 180</u> 12	<u>0 – 8</u> 3	<u>0 – 226</u> 46	<u>1 – 73</u> 13	<u>28 – 493</u> 152
2	78	10	<u>4,75 – 8,25</u> 6,54	<u>75,7 – 119,3</u> 100,8	<u>0 – 134</u> 10	<u>0 – 10</u> 1	<u>0 – 130</u> 18	<u>0 – 32</u> 10	<u>16 – 544</u> 127
3	78	10	<u>4,77 – 8,07</u> 6,55	<u>91,9 – 116,4</u> 100,5	<u>0 – 93</u> 8	<u>0 – 6</u> 1	<u>0 – 57</u> 15	<u>0 – 50</u> 9	<u>17 – 395</u> 124
4	78	10	<u>4,16 – 8,32</u> 6,58	<u>80,2 – 111,2</u> 101,5	<u>0 – 102</u> 6	<u>0 – 5</u> 1	<u>0 – 44</u> 7	<u>0 – 40</u> 8	<u>5 – 412</u> 114

мой группы биогенов в водах Балаклавской бухты (слой 0 – 10 м), зафиксированные нами в течение последнего десятилетия. Здесь же показано среднее содержание этих элементов, отражающее фоновое состояние вод, на котором развивается апвеллинг. Видно, что фактическое содержание каждого элемента из группы исследуемых биогенов в верхнем 10-метровом слое подвержено существенным вариациям, абсолютный диапазон которых оценивается в 1 – 2 порядка. Осредненная за все время наблюдений для разных участков бухты и двух горизонтов концентрация различается в разы.

Сведения по рассматриваемым гидрохимическим параметрам, характерным для подповерхностных вод, поступающих в бухту в системе апвеллинговой циркуляции (слой 50 – 75 м) подобраны из литературных источников. Соответствующие концентрации, заимствованные из [12*, 13**], равны: PO₄ = 15,5 – 30 мкг/л*, NH₄ = 84 мкг/л*, NO₃ = 10,5 – 17,5 мкг/л*, NO₂ = 1 – 2 мкг/л**, SiO₂ = 385 – 540 мкг/л**. Их осредненные значения, а также данные о максимальных и средних концентрациях рассматриваемой группы соединений для вод бухты, которые выбраны из табл.2, помещены в табл.3. Здесь же приведены расчетные промежутки времени, в течение которых концентрация биогенов в бухте под влиянием апвеллинга снизится до значений концентрации апвеллинговых вод.

Из табл.2 видно, что при апвеллинге воды, взаимодействующие на участках бухты, по содержанию биогенов могут различаться в десятки и сотни раз. Однако, как показали выполненные нами расчеты, снижение максимальной концентрации первых трех элементов из рассматриваемой группы биогенов до их содержания в апвеллинговых водах происходит достаточно быстро, – от 1 до 13 ч (~ 0,5 сут). Нитриты и нитраты в данном случае оказа-

Т а б л и ц а 3. Максимальная и средняя концентрация гидрохимических показателей в водах Балаклавской бухты; их среднее содержание в апвеллинговых водах; интервалы времени, в течение которых избыточная концентрация биогенных элементов в бухте снизится до значений концентрации апвеллинговых вод.

показатель	воды бухты, мкг/л	апвеллинговые воды, мкг/л	время, ч
	максимум	среднее	
SiO_2	1372	462	1
NH_4	212	84	2
PO_4	315	23	13
NO_2	30	1,5	48
NO_3	1385	14	398
	среднее	среднее	
SiO_2	266	462	–
NH_4	21	84	–
PO_4	15	23	–
NO_2	5	1,5	8
NO_3	270	14	77

лись более устойчивыми. Соответствующие затраты времени для этих элементов гораздо большие, 48 и 389 ч (~ 2 – 17 сут).

В основном, эта разница обусловлена тем, что в рассматриваемой ситуации соотношение концентраций в водах бухты и в водах апвеллинга до их взаимодействия для первых трех элементов (SiO_2 , NH_4 , PO_4) гораздо меньшее по сравнению с этим же соотношением для NO_2 и NO_3 .

Представленное выше позволяет утверждать следующее. Во время развитого апвеллинга только за счет механизма турбулентной диффузии концентрация биогенов в бухте, даже в чрезвычайно редких ситуациях крайнего загрязнения (случаи дноуглубительных работ, паводки, ливни), в течение времени ~ от 0,5 до 17 сут может снизиться на 1 – 2 порядка, до концентрации подповерхностной черноморской воды.

Отметим, что полученные нами результаты хорошо согласуются с расчетными данными по времени регенерации органического вещества в прибрежной зоне Крыма [14]. Авторами этой статьи установлено, что время круговорота органического вещества для различных глубин и степени загрязнения районов прибрежной зоны Крыма изменяется в интервале от двух недель до нескольких дней и даже часов.

Развитый апвеллинг, возникающий на фоне средних для Балаклавской бухты концентраций биогенных элементов (нижняя часть табл.3), способен привести к аналогичному эффекту для NO_2 , NO_3 в течение 8 – 77 ч (от 0,3 до 3 сут).

Средние концентрации соединений SiO_2 , NH_4 , PO_4 в верхнем 10-метровом слое бухты меньше, чем в водах апвеллинга (табл. 3). Это означает, что в ходе апвеллинга, развивающегося в условиях фоновых концентраций, воды бухты насыщаются этими биогенами.

Согласно [4, 5], при учете процессов утилизации временные показатели,

представленные в табл.3, сократятся на 35 %. То есть при апвеллинге в условиях экстремального загрязнения и при апвеллинге в фоновых условиях время выравнивания концентрации биогенов во взаимодействующих водах уменьшится соответственно до $\sim 0,2 - 11$ и до $\sim 0,2 - 2$ сут.

Если учесть, что цикл апвеллинга в исследуемом районе изменяется в пределах 1– 10 суток, при преобладании апвеллингов длительностью около суток [15], то можно считать, что полученные количественные оценки, безусловно, свидетельствуют о значимости этого явления, как природного фактора очистки прибрежных вод в районе Балаклавы.

Заключение. На базе массива океанологических данных раскрыты закономерности проявления апвеллинга в термохалинном поле и в полях основных гидрохимических элементов на акватории Балаклавской бухты и смежного участка моря. Оценена значимость данного явления, как природного фактора, повышающего качество вод рассмотренной акватории.

Показано, что апвеллинг в термохалинном поле Балаклавской бухты сопровождается как существенными количественными, так и качественными структурными изменениями. В частности, трансформируется или полностью исчезает верхний квазиоднородный слой. Смещается по вертикали и расслаивается слой скачка, обостряется вертикальный градиент в отдельных его прослойках. В подповерхностных и придонных водах формируются локальные фронтальные образования с поперечным масштабом в несколько сотен метров. На участках активного взаимодействия апвеллинговых и местных вод обостряется горизонтальный градиент температуры и солености.

Выполнен анализ содержания ряда загрязняющих веществ на акватории бухты. Выявлено, что поверхностно-склоновые и хозяйственно-бытовые сточные воды, попадающие в мелководную часть бухты, создают опасную экологическую ситуацию. Фактическое содержание каждого элемента из группы рассмотренных биогенов (NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4 , SiO_2) в верхнем 10-метровом слое Балаклавской бухты, заметно превышающее природный фон, подвержено существенной изменчивости с абсолютным диапазоном, оцениваемым в 1 – 2 порядка. Осредненная за все время наблюдений для разных участков бухты концентрация этих соединений различается в разы.

Апвеллинг, вызывающий адвекцию подповерхностных черноморских вод в Балаклавскую бухту, – один из значимых факторов, способствующих существенному улучшению экологической ситуации. Проникающие в бухту в системе апвеллинговой циркуляции морские воды отличаются низкой температурой, повышенной соленостью и пониженной концентрацией растворенного кислорода. По содержанию биогенных элементов (NO_3 , NH_4 , PO_4 , SiO_2) и значениям pH, поступающая в бухту морская вода чище, чем поверхностная вода собственно бухты.

Показано, что апвеллинг как в условиях экстремального загрязнения акватории бухты, так и при фоновых условиях способствует достаточно быстрому разбавлению и повышению качества ее загрязненных вод. Время выравнивания концентрации биогенов во взаимодействующих в ходе апвеллинга водах за счет механизма турбулентной диффузии и процессов утилизации при экстремальном загрязнении – от 0,2 до 11 и от 0,2 до 2 сут при фоновой ситуации. Если учесть, что цикл апвеллинга в исследуемом

районе изменяется в пределах 1 – 10 сут, то полученные количественные оценки свидетельствуют о значимости этого явления, как природного фактора очистки прибрежных вод в районе Балаклавы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никитин В.Н., Скворцов Е.Ф.* Непериодические изменения гидрологических элементов и состава планктона у южных берегов Крыма // Записки Крымского общества естествоиспытателей. – 1926. – т.9. – С.67-79.
2. *Богданова А.К., Корпачев Л.Н.* Стонно-нагонная циркуляция и ее роль в гидрологическом режиме Черного моря // Метеорология и гидрология. – 1959. – № 4. – С.26-32.
3. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). – Киев: Наукова думка, 1992. – 244 с.
4. *Немировский М.С., Куфтаркова Е.А.* Об исследованиях глубинных выпусков сточных вод в морскую среду // Водные ресурсы. – 2004. – № 3. – С.504-508.
5. *Немировский М.С., Куфтаркова Е.А., Ломакин П.Д., Щуров С.В.* Скорость трансформации гидрохимических показателей в затопленных полях сточных вод в Черном море // Доп. НАНУ. – 2004. – № 2. – С.131-135.
6. *Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов.* – М.: ВНИРО, 1988. – 119 с.
7. *Зац В.И., Лукьяненко О.А., Яцевич Г.В.* Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 120 с.
8. *Белокопытов В.Н., Ломакин П.Д., Субботин А.А., Щуров С.В.* Фоновая характеристика и сезонная изменчивость вертикальной стратификации термохалинного поля у побережья Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. – вып.1 (6). – С.22-28.
9. *Субботин А.А., Троценко О.А., Ломакин П.Д., Щуров С.В.* Основные черты гидрологической структуры на шельфе Крыма и их влияние на развитие прибрежной марикультуры / Марикультура мидий на Черном море. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – С.27-34.
10. *Овсяный Е.И., Романов А.С., Миньковская Р.Я., Красновид И.И., Озюменко Б.А., Цымбал И.М.* Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. – вып.2. – С.138-152.
11. *Моделирование процессов самоочищения вод шельфовой зоны моря* / Под ред. Заца В.И., Гольдберга Г.А. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 230 с.
12. *Сорокин Ю.И.* Черное море: природа, ресурсы. – М.: Наука, 1982. – 217 с.
13. *Куфтаркова Е.А., Ковригина Н.П., Родионова Н.Ю.* Гидрохимическая характеристика вод Балаклавской бухты и прилегающей к ней прибрежной части Черного моря // Гидробиологический журнал. – 1999. – т.35, № 3. – С.88-99.
14. *Куфтаркова Е.А., Ковригина Н.П.* О влиянии сбросов сточных вод на гидрохимическую структуру прибрежной зоны моря // Исследования шельфовой зоны Азово-Черноморского бассейна. – Севастополь: МГИ НАНУ, 1995. – С.65-70.
15. *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 комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – вып.20. – С.171-178.

Материал поступил в редакцию 22.05.2010 г.