



УДК 504.064.3 (262.5)

Н. П. Ковригина, канд. геогр. наук, с. н. с., **М. А. Попов**, м. н. с., **Е. В. Лисицкая**, канд. биол. наук, н. с.,
Е. А. Куфтаркова, канд. геогр. наук, с. н. с., **В. И. Губанов**, канд. геогр. наук, с. н. с.

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ВОД БАЛАКЛАВСКОЙ БУХТЫ (ЧЁРНОЕ МОРЕ) В ПЕРИОД 2000 – 2007 гг.

Исследована пространственно-временная изменчивость гидролого-гидрохимических и гидробиологических показателей в Балаклавской бухте на основе мониторинга 2000 – 2007 гг. Дана оценка трофического уровня вод по величинам индекса эвтрофикации E-TRIX: мелководная часть бухты имеет высокий (> 5.0) уровень трофности, глубоководная – низкий (< 4.0). Показано влияние прибрежного апвеллинга на структуру фито- и меропланктона в тёплый период года.

Ключевые слова: Балаклавская бухта, термохалинная структура, кислород, биогенные вещества, индекс эвтрофикации E-TRIX, апвеллинг, фитопланктон, меропланктон

Материалы предшествующих исследований показали, что гидрологический и гидрохимический режимы вод Балаклавской бухты формируются под воздействием гидрометеорологических условий, сгонно-нагонных явлений и антропогенного фактора [1, 2, 5, 13, 20]. В результате слабого водообмена мелководная часть бухты, принимающая сточные и ливневые воды, является наиболее загрязненной [8, 9]. Объём сточных вод, поступающих в бухту, составляет 4.4 млн. м³/год, из которых 3.0 млн. м³/год проходит через главный коллектор, расположенный непосредственно у входа в бухту на глубине 10 м [8]. Ещё одним источником загрязнения являются ливневые стоки, поступающие в бухту с речными водами Балаклавы, имеющими объём 196.9 тыс. м³/год [6]. Некоторое снижение антропогенного пресса после вывода подводного флота и уменьшения объёмов судоремонтных работ положительно отразилось на экологическом состоянии бухты [8]. Однако в настоящее время в связи с развитием Балаклавы как курортной зоны влияние антропогенного фактора усиливается за счёт увеличения точечных береговых источников загрязнения, а также количества маломерных судов, базирую-

щихся в бухте. Вблизи локальных источников загрязнения наблюдались максимальные концентрации тяжёлых металлов [16], общего взвешенного и растворённого органических веществ и растворённых углеводов [17].

Ветровые условия определяют интенсивность перемешивания вод, и тем самым оказывают влияние на экологическое состояние Балаклавской бухты. Ситуации возможного распространения загрязняющих примесей от прибрежных источников при разных гидродинамических условиях в бухте приведены в [20]. В зоне влияния выпуска в прибрежной части моря по результатам гидрооптических наблюдений отмечено локальное загрязнение вод, проявляющееся в максимальных концентрациях общего взвешенного, растворённого органического веществ и растворённых нефтепродуктов. [17]. Кроме того, в [16] представлена характеристика загрязнения донных отложений Балаклавской бухты токсичными металлами. Показано, что максимальные концентрации металлов приурочены к локальным источникам загрязнения.

Отрицательное воздействие загрязнения

выражается в постепенном обеднении видового состава, снижении биомассы и сокращении зарослей некоторых видов фитобентоса [14], а также приводит к изменениям в структурной организации зообентоса [7]. Усиление антропогенной нагрузки отразилось и на меропланктоне: отмечено уменьшение количества видов личинок донных беспозвоночных и снижение численности личинок десятиногих раков [11].

Цель настоящей работы – изучение гидролого-гидрохимических характеристик и планктонных организмов по результатам комплексного мониторинга, а также выявление масштаба антропогенного воздействия в различных частях Балаклавской бухты.

Материал и методы. В процессе мониторинга, проводимого в Балаклавской бухте в 2000 – 2007 гг., выполнено 73 съёмки: с июля 2000 по декабрь 2001 гг. съёмки проводились с периодичностью 2 – 3 недели; в 2002 – 2006 – ежемесячно, в 2007 г. – раз в квартал. Исследования охватывали мелководную часть бухты (ст. 1; глубина 8 м), глубоководную (ст. 2 и 3; 20 и 15 м) и взморье (ст. 4; 60 м) (рис. 1).

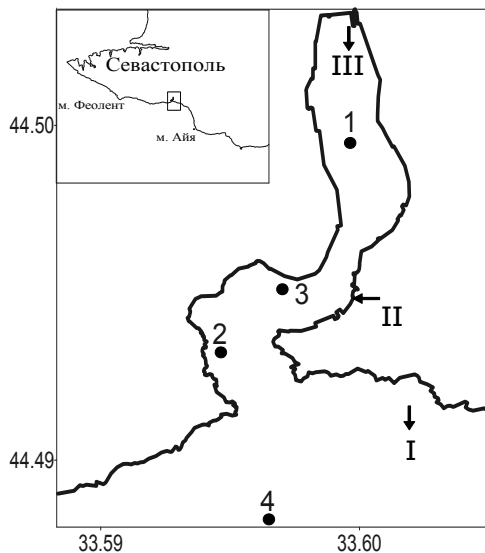


Рис. 1 Схема станций экологического мониторинга и точечных источников загрязнения в Балаклавской бухте (I – выпуск сточных вод г. Балаклава, II – ливневой сток, III – речной сток)

Fig. 1 The scheme of ecological monitoring stations and sources of pollution in the Balaklava Bay (I – outlet of Balaklava domestic sewages, II - storm drain, III - river drain)

Пробы на гидролого-гидрохимические анализы отбирали с поверхности и с горизонтов 7 (ст. 1) и 10 м (остальные станции) батометром БМ-48. Температуру измеряли опрокидывающимися глубоководными термометрами, солёность определяли аргентометрическим методом. В комплекс гидрохимических параметров входили: растворённый кислород, биохимическое потребление кислорода на 5-е сутки (БПК₅), величина рН, кремний, а также неорганические и органические формы азота и фосфора. Гидролого-гидрохимические анализы выполняли по стандартным методикам [12, 19].

Гидробиологические исследования включали определение фито- и меропланктона. Пробы фитопланктона брали с поверхности и обрабатывали по общепринятой методике [8]. Пробы меропланктона отбирали сетью Джеди (диаметр входного отверстия 36 см, размер ячеек газа 135 мкм) в мелководной части (ст. 1) в слое 7 – 0 м, на остальных станциях – в слое 10 – 0 м [10].

За период исследований отобрано 438 гидролого-гидрохимических проб, 268 проб фитопланктона и 468 – меропланктона. Выполнено более 5000 гидролого-гидрохимических анализов.

Для определения уровня трофности вод бухты выбран индекс эвтрофикации (E-TRIX) [22], при расчёте которого использовались синхронные измерения гидрохимических и гидробиологических характеристик. Величина E-TRIX является функцией концентрации растворённого кислорода, общего фосфора, суммы минеральных форм азота и хлорофилла «а» и рассчитывается по формуле:

$$E-TRIX = \lg ([Chl] \times [D\%O_2] \times [PT] \times [DIN] \times 1.5) / 1.2,$$

где Chl – хлорофилл «а» в мкг/л; D%O₂ – отклонение в абсолютных значениях растворённого кислорода от 100% насыщения; PT – общий фосфор в мкг/л; DIN – растворённая форма суммы минерального азота в мкг/л. Данные по хлорофиллу «а», используемые для расчёта величины E-TRIX, любезно предоставлены Л.В. Стельмах.

Результаты и обсуждение. Температура. В период исследований среднегодовая температура на поверхности составляла $15.0 \pm 0.7^\circ\text{C}$, на глубине 10 м – $14.2 \pm 0.6^\circ\text{C}$, практически не отличаясь от показателей для Ялтинского залива – соответственно 14.8 и 14.2°C [5]. Минимальное абсолютное значение температуры воды (6.8°C) зафиксировано в феврале 2003 г., максимальное (26.8°C) – в августе 2001 г. Диапазон изменчивости температуры за весь период наблюдений на поверхности достигал 20°C , на горизонте 10 м – 18.7°C .

Распределение среднемесячной температуры воды на поверхности кутовой части бухты имело чётко выраженный внутригодовой ход (рис. 2а). Зима (январь – март) характеризовалась наименьшими среднемесячными температурами с минимумом в феврале. С апреля по май – интенсивный прогрев верхнего слоя вод. С мая по июнь среднемесячная температура увеличивалась незначительно, что связано с небольшой глубиной залегания термоклина и часто повторяющимся выходом на поверхность холодных вод при сгонных ветрах. Летний период продолжался с июля по сентябрь с максимумом среднемесячных температур в августе. В глубоководной части бухты и на взморье сезонный ход температуры аналогичен ходу в кутовой части (рис. 2б, в), за исключением того, что с мая по июнь среднемесячная температура практически не повышается. Это, по-видимому, связано с большей активностью сгонных процессов на взморье и в глубоководной части бухты, по сравнению с кутовой. На горизонтах 7 – 10 м сезонный ход температуры во всех частях бухты и на взморье практически совпадает (рис. 2).

Солёность. В кутовой части бухты диапазон изменчивости солёности составлял 4.56‰ на поверхности и 4.09‰ на 7 м, в глубоководной части – 2.44‰ на поверхности и 0.89‰ на 10 м, на взморье соответственно 0.89 и 0.78‰. В кутовой части бухты минимум солёности (13.4‰), вызванный распреснением (сильные осадки, таяние снега), наблюдали на

поверхности в марте 2004 г. В мористой части минимум солёности был не столь экстремальным (17.27‰) и зафиксирован в апреле 2005 г. (возможно, связан с длительными осадками и активизацией стоков пресных вод). Максимум солёности на взморье (18.01‰ на поверхности) наблюдали в декабре 2001 г. во время усиления вертикальной конвекции. Максимальная солёность (18.31‰) в глубоководной части бухты зафиксирована в сентябре 2000 г. во время прибрежного апвеллинга.

Анализ распределения среднемесячных величин солёности за весь период наблюдений (рис. 2) показал значительные расхождения в годовом ходе солёности для различных участков бухты. В кутовой части бухты минимальная среднемесячная солёность на поверхности отмечена в марте, а максимальная в октябре. В глубоководной минимум и максимум совпадают по времени с кутовой, но величины здесь выше. Так, минимум солёности в глубоководной части бухты был выше на 0.8‰, а максимум – на 0.2‰. На взморье минимум среднемесячной солёности на поверхности приходился на июль (17.58‰), максимум (17.86‰) – на сентябрь и декабрь. Такое распределение солёности объясняется влиянием поверхностного стока на кутовую часть и на бухту в целом, на взморье влияние поверхностного стока значительно меньше. Для горизонтов 7 – 10 м сезонное распределение среднемесячных величин солёности в кутовой, глубоководной частях бухты и на взморье имеют меньшие различия, чем на поверхности.

Средние за весь период наблюдения величины солёности на поверхности изменялись от 17.30 ± 0.03 в кутовой части до 17.74 ± 0.02 ‰ на взморье, на горизонте 7 – 10 м – от 17.69 ± 0.02 до 17.81 ± 0.02 ‰ соответственно. Анализ величин солёности показал, что среднегодовая солёность незначительно повышается от кутовой части бухты к взморью, а её абсолютные значения хорошо согласуются с долговременными трендами солёности в прибрежной зоне Южного берега Крыма [3].

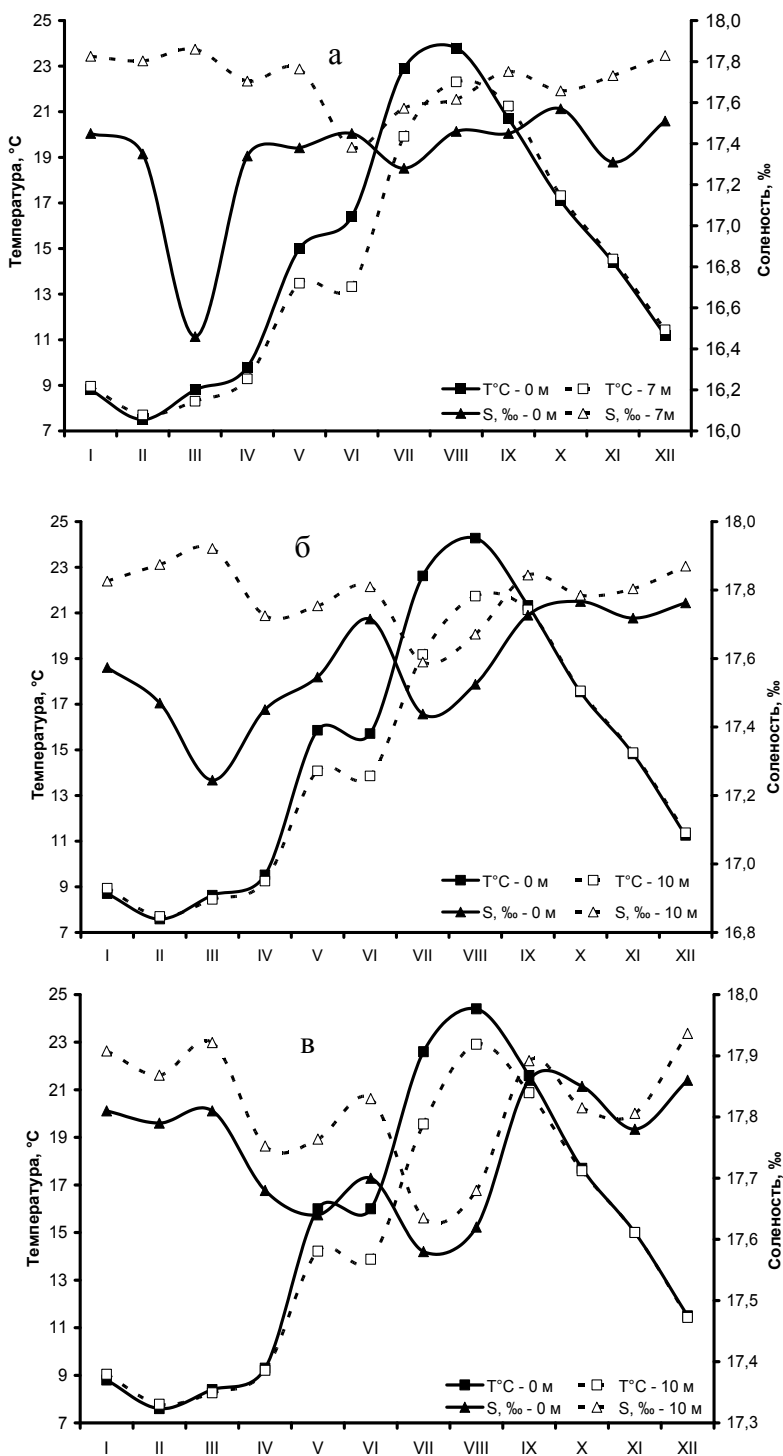


Рис. 2 Среднемесячные значения температуры и солёности на ст.1 (а), ст. 2 (б) и ст. 4 (в) в Балаклавской бухте в период 2000 – 2007 гг.

Fig. 2 Monthly average values of temperature and salinity at st. 1 (a), st. 2 (б) и st. 4 (в) in Balaklavskaya Bay during 2000 – 2007

Наряду с плавными сезонными колебаниями температуры и солёности воды эти параметры могут резко изменяться во время прибрежного апвеллинга. Примеры наблюдаемых нами апвеллингов, вызванные локальными сгонными и вдольбереговыми ветрами, приведены в [8, 18], где показано их влияние на распределение гидролого-гидрохимических характеристик и планктонных организмов. В [2] сделана попытка исследования влияния крупномасштабного апвеллинга на Балаклавскую бухту и прилегающие к ней черноморские воды на базе спутниковой информации.

Гидрохимические показатели. Рассмотрим динамику гидрохимических показателей в водах Балаклавской бухты на примере распределения растворённого кислорода, величин рН, БПК₅ и биогенных веществ, как наиболее показательных характеристик её экологического состояния. В табл. 1 представлены экстремальные и средние концентрации гидрохимических показателей за 2000 – 2007 гг. в различных частях бухты и на взморье.

Растворённый кислород.

Размах колебаний величин содержания кислорода за весь период исследований на поверхности составил 3.58 мл/л и 28.1 % насыщения для мелководной части бухты (ст. 1), в глубоководной части (ст. 2 и 3) – от 3.02 до 3.18 мл/л и от 21.8 до 31.3%, на взморье (ст. 4) – 3.20 мл/л и 34.0 % насыщения (табл. 1). Отмечено повышение средних за период исследований величин содержания кислорода с продвижением от мелководной части бухты (6.38 мл/л) к открытому морю (6.58 мл/л) (табл.1).

Относительное содержание кислорода имело аналогичную тенденцию (табл. 1).

Табл. 1 Диапазон изменений концентраций гидрохимических показателей и их средние величины
Table 1 Range of changes of hydrochemical indicators and their average sizes

№ ст.	К-во изм., п	Н, м	O ₂ ,		БПК ₅ , мг/л	PO ₄ ³⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Si
			мл/л	%						
1	73	0	<u>4.40÷7.98</u>	<u>85.3÷113.4</u>	<u>0.10÷3.36</u>	<u>1.7÷85.2</u>	<u>0÷25.0</u>	<u>3.8÷1385</u>	<u>0.7÷201</u>	<u>69.0÷1090</u>
			6.38	99.9	0.97	15.0	4.9	286	21.7	270
2	73	0	<u>4.82÷7.84</u>	<u>90.0÷111.8</u>	<u>0.05÷2.53</u>	<u>0.7÷72.0</u>	<u>0÷30.0</u>	<u>1.2÷1290</u>	<u>0.7÷136</u>	<u>44.0÷1372</u>
			6.46	100.9	0.84	10.5	3.2	163	17.8	202
3	73	0	<u>4.83÷8.01</u>	<u>85.3÷116.6</u>	<u>0÷3.43</u>	<u>0÷68.0</u>	<u>0÷11.2</u>	<u>0.3÷995</u>	<u>1.0÷59.0</u>	<u>36.0÷1290</u>
			6.50	101.6	0.77	8.0	2.6	108	14.7	188
4	73	0	<u>4.89÷8.09</u>	<u>86.2÷120.2</u>	<u>0÷1.83</u>	<u>0÷63.0</u>	<u>0÷6.1</u>	<u>0÷191</u>	<u>0÷41.5</u>	<u>25.0÷479</u>
			6.58	102.9	0.63	6.6	1.3	19.3	9.0	133
1	73	7	<u>4.63÷8.13</u>	<u>89.7÷116.6</u>	—	<u>0÷180</u>	<u>0÷8.2</u>	<u>0.2÷226</u>	<u>0.7÷54.0</u>	<u>33.0÷493</u>
			6.48	100.0	—	12.1	2.9	48.6	12.2	159
2	73	10	<u>4.75÷8.25</u>	<u>75.7÷119.3</u>	—	<u>0÷134</u>	<u>0÷5.4</u>	<u>0÷130</u>	<u>0÷32.0</u>	<u>29.0÷544</u>
			6.53	100.5	—	10.3	1.4	18.9	9.8	133
3	73	10	<u>4.77÷8.07</u>	<u>91.9÷116.4</u>	—	<u>0÷92.5</u>	<u>0÷6.1</u>	<u>0÷57.0</u>	<u>0÷50.0</u>	<u>27.0÷395</u>
			6.55	100.5	—	8.1	1.3	15.7	8.9	128
4	73	10	<u>4.16÷8.32</u>	<u>80.2÷111.2</u>	—	<u>0÷63.0</u>	<u>0÷5.0</u>	<u>0÷44.0</u>	<u>0÷40.0</u>	<u>24.0÷412</u>
			6.58	101.4	—	4.7	1.0	7.0	7.5	121

В придонном слое размах колебаний величин содержания кислорода на всех станциях составил от 3.30 до 4.16 мл/л и от 24.5 до 49.5% насыщения. Как и на поверхности, отмечено незначительное увеличение средних за весь период исследований величин абсолютного и относительного содержания кислорода с продвижением от кутовой части бухты к открытому морю (табл. 1).

Распределение кислорода подвержено сезонной изменчивости вследствие изменения температуры, динамических процессов, процесса фотосинтеза и антропогенного влияния (рис. 3). С января по апрель происходит повышение содержания кислорода от 7.01 до 7.47 мл/л. Абсолютный максимум кислорода (8.13 мл/л и 116.6% насыщения) отмечен в марте 2003 г. на горизонте 7 м в мелководной части бухты. Характерный пример весеннего массового развития *Skeletonema costatum* (2.3 млн. кл./м), зафиксированный 27 мая 2004 г., привёл к пересыщению вод кислородом на поверхности ст. 2 до 109.3%.

Летний период характеризуется снижением абсолютного содержания кислорода. Минимальные значения (4.40 мл/л и 85.3% насыщения) на поверхности и (4.63 мл/л и 89.7%) в придонном слое мелководной части бухты отмечены в августе 2005 г. вследствие усиления процесса окисления органических веществ в условиях высоких температур. Случаев дефицита кислорода во всей толще вод бухты не отмечали.

В загрязнённых прибрежных водах при высоких значениях температуры и концентраций биогенных веществ возможен максимум фитопланктона, приводящий к пересыщению кислородом. Примером тому служит массовое развитие *S. costatum* (2.4 млн. кл./м) в августе 2004 г., которое обусловило пересыщение толщи вод кислородом до 107%. Ещё один пример летнего «цветения» воды зафиксирован в июне 2007 г. за счет повышения численности *Emiliana huxleyi* во всех районах бухты. В мелководной части и на взморье её численность составляла 1.3, в глубоководной части – 1.6 млн.

кл./м. Массовое развитие *E. huxleyi* привело к пересыщению вод кислородом на поверхности от 108 в мелководной части до 120 % на взмо-

рье, что является абсолютным максимумом относительного содержания кислорода за период исследований.

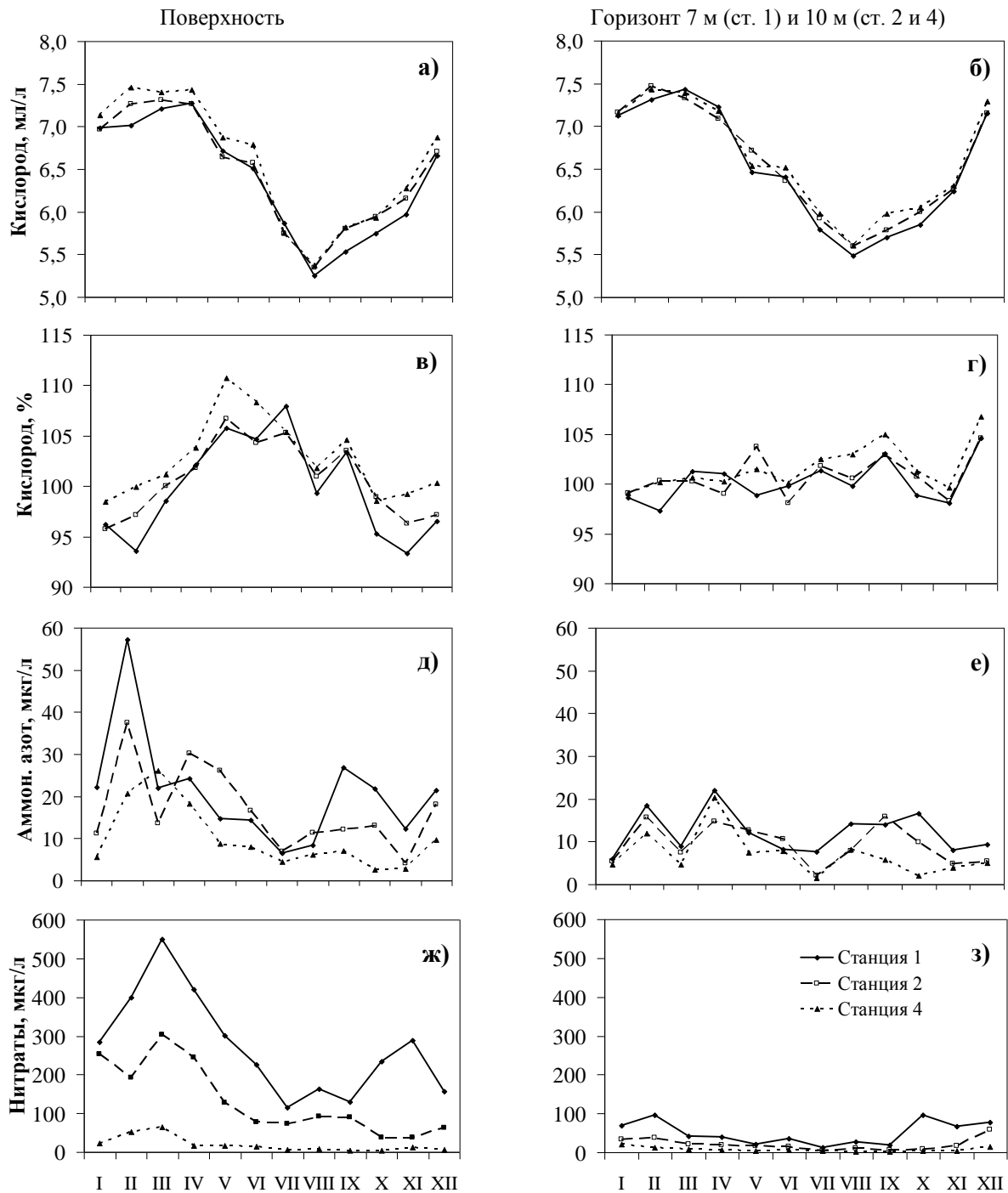


Рис. 3 Сезонная динамика средних значений абсолютного (а, б) и относительного (в, г) содержания кислорода, аммонийного (д, е) и нитратного (ж, з) азота в водах Балаклавской бухты в 2000 – 2007 гг.

Fig. 3 Seasonal dynamics of average absolute (а, б) and relative (в, г) oxygen, ammonium (д, е) and nitrates (ж, з) in Balaklavskaya Bay during 2000 – 2007

Величина рН. Низкие величины рН (8.04 – 8.06) отмечали в феврале – марте в период пониженной вегетационной активности фитопланктона и обильного выпадения осадков; максимальные величины (8.48 – 8.50) наблюдали в августе, сентябре и октябре. Основной тенденцией распределения рН является понижение значений в мелководной загрязнен-

ной части бухты и повышение в районе выхода из бухты. Сезонное распределение значений величины рН нарушается из-за ряда причин как антропогенного, так и природно-климатического характера. В табл. 2 представлены ситуации, в результате которых отмечали нарушение гидрохимических условий в бухте, и в том числе понижение величины рН.

Табл. 2 Изменение гидрохимических характеристик под влиянием экстремальных гидрометеорологических условий и антропогенного воздействия

Table 2 Change of hydrochemical characteristics under the influence of extreme hydrometeorological conditions and anthropogenic impact

Причина изменения	Дата	№ ст.	Н, м	Т, °С	Концентрация гидрохимических характеристик								
					S, ‰	рН	O ₂ , %	NO ₂	NO ₃	NH ₄	PO ₄	Si	N _{орг}
Осадки и ливневой сток	26.02.01	1	0		17.02	8.04	90	13	130				358
		2	0		17.02	8.05	93	8	65				
	09.04.01	1	0		17.29	8.11			1072	40			332
		2	0		17.60	8.10	99		148	28			
	23.01.02	1	0		17.27		97		323	32	19		30100
		2	0		17.54		95		170		17		27800
	20.02.02	1	0		17.27		89	21	533	28	20	354	3033
2		0		17.32		94	13	566	20		325	3043	
19.04.02	1	0		17.45				378				3434	
	2	0		17.07				444			340	3434	
Таяние снега	01.03.04	1	0		13.40	8.11	92	22	1385	41	40	1090	2131
		2	0		15.77	8.21	94		1290	18	26	1372	
	30.03.05	1	0		16.33	8.05	90		590	24	47	778	1509
		2	0		16.89	8.16			625			481	821
	28.02.06	1	0		17.27	7.35	89		556				708
		2	0		16.86	8.16	93		1260	31		366	
27.03.06	1	0		16.69	8.17			1222	25		387		
Хозбытовой сток	27.09.00	1	0					25		85	428		
	11.09.01	2	0		17.29			30	370				
	18.10.01	1	0		17.42		90		340	25	332		
Апвеллинг	18.06.03	2	10	8.7	17.9	8.11	76		606		134		
		1	7	8.8	18.05	8.12	96		49		180		
		2	0	10.1	18.05	8.12			40		72		
		2	10	8.8	18.17	8.11	98				28		
		4	0	9.4	18.16	8.12					20		
		4	10	8.7	18.19	8.11					22		

Единичный случай экстремально низкого значения рН (7.35) наблюдали в феврале 2006 г. в поверхностном слое мелководной части в результате поступления в бухту большого количества талых вод. Следующим по значимости фактором, способствующим понижению значений величины рН, является адвекция глубинных вод в бухту. Понижение величины рН

наблюдали также в период поступления в бухту ливневых сточных вод (рН ливневых стоков 7.82 – 7.43). Пробы морской воды, отобранные после дождя в мелководной части бухты 9 апреля 2001 г., имели все признаки загрязнения ливневым стоком: пониженные значения солёности – 17.29 ‰ и величины рН – 8.11, а также

повышенные концентрации нитратного азота – 1072 мкг/л (табл. 2).

БПК₅. Величины БПК₅ определяли только на поверхности. Их значения изменялись от 0 до 3.43 мг/л. Максимальные значения в бухте, отмеченные на ст. 3 (3.43 мг/л), на ст. 1 (3.26 мг/л) и на ст. 2 (2.47 мг/л), превышали ПДК (2.00 мг/л) в 1.2 – 1.7 раза. На взморье максимальное значение равнялось 1.83 мг/л; превышение ПДК не отмечалось. Средние за период исследований величины БПК₅ уменьшались с продвижением от кутовой части бухты к открытому морю: 0.97 (ст. 1), 0.84 (ст. 2), 0.77 (ст. 3) и 0.63 мг/л (ст. 4).

Пространственное распределение величин БПК₅ в водах бухты за исследуемый период хорошо иллюстрирует рис. 4. В интервале от 0 до 0.50 мг/л отмечен наиболее высокий (от 30 до 50) процент повторяемости величин БПК₅. Снижение процента повторяемости величин от 29 до 40 отмечалось в интервале 0.51 – 1.00 мг/л. Когда значения БПК₅ приближались к предельно допустимой концентрации, повторяемость их величин снижалась от 3 до 15 %. В интервале выше ПДК повторяемость значений БПК₅ составляла 3 – 5 % на всей исследуемой акватории.

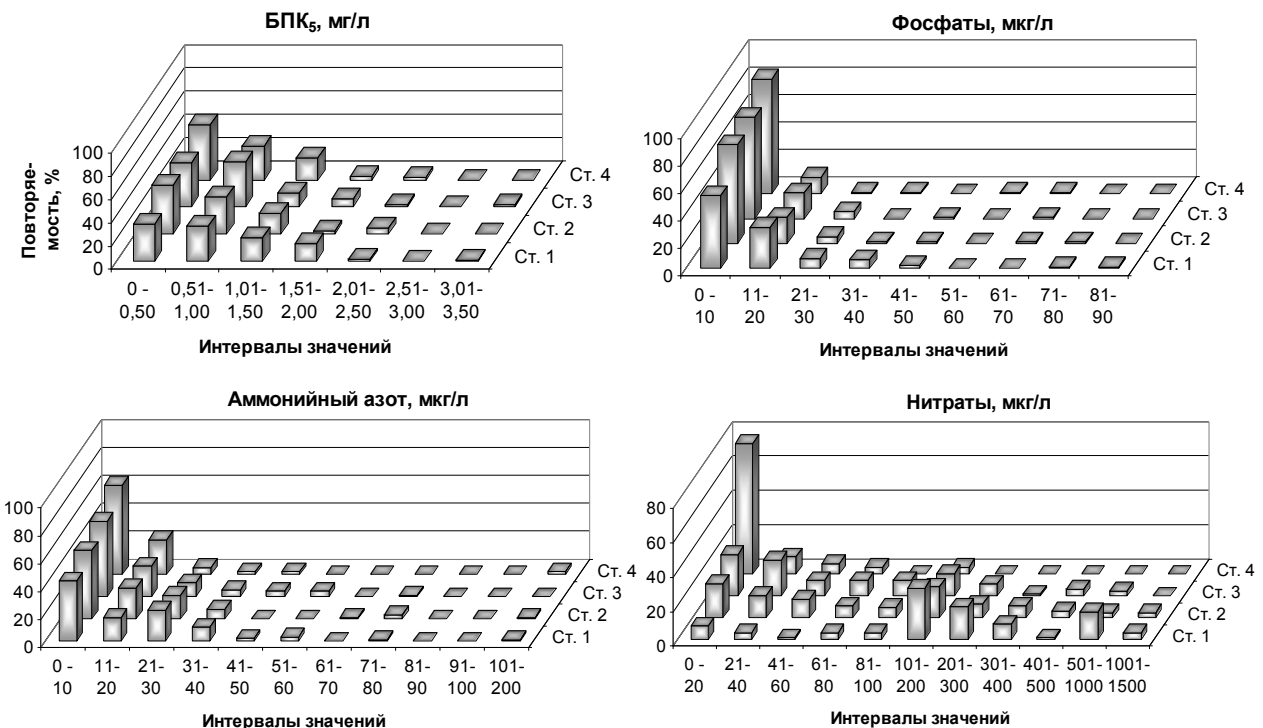


Рис. 4 Гистограммы повторяемости (%) величин БПК₅, фосфатов, аммонийного и нитратного азота
Fig. 4 Histograms of repeatability (%) of BOD₅, phosphates, ammonia and nitrate nitrogen

Аммонийный азот. Концентрация аммонийного азота изменялась за весь период наблюдений в широком диапазоне – от 0 до 201 мкг/л (табл. 1). В направлении от мелководной части бухты к взморью и от поверхности ко дну диапазон его изменчивости сужается от 2 до 5 раз. Средние величины снижались в направлении от кутовой части бухты к взморью

более чем в 2 раза на поверхности и в 1.5 раза – в придонном слое. Средние значения, отмеченные на взморье (9.0 на поверхности и 7.5 мкг/л в придонном слое), почти не отличались от таковых в открытых прибрежных водах. В интервале 0 – 20 мкг/л отмечена наибольшая повторяемость средних концентраций аммония, составляющая 60 – 89% на поверхности (рис. 4)

и 85 – 92% в придонном слое.

Сезонные изменения средних концентраций аммонийного азота на поверхности и в придонном слое бухты отличались синхронностью распределения на всех станциях; размах колебаний уменьшался от поверхности ко дну и от кутовой части бухты к открытому морю (рис. 3 д, е).

Нитритный азот. Диапазон колебаний содержания нитритного азота на поверхности изменялся от 0 до 30 мкг/л, в придонном слое – от 0 до 8 мкг/л (табл. 1). Максимальные концентрации нитритного азота отмечались в мелководной части бухты, что свидетельствует о загрязнении акватории хозяйственными и ливневыми водами. В пробе ливневого стока в апреле 2003 г. концентрация нитритов составляла 700 мкг/л. Максимальные величины нитритного азота (30 и 25 мкг/л), превышающие ПДК по рыбохозяйственному водопользованию, зафиксированы соответственно в глубоководной и мелководной частях бухты в сентябре 2001 и 2000 гг. Средние величины нитритного азота имели низкие значения и не превышали 5 мкг/л, их концентрации в бухте были в 3 – 4 раза выше, чем в открытой части.

Нитратный азот. Концентрация нитратного азота имеет широкий диапазон изменчивости (0 – 1385 мкг/л) вследствие поступления в бухту пресных вод различного происхождения (табл. 1). На поверхности мелководной части бухты отмечена максимальная концентрация – 1385 мкг/л, которая в 7 раз выше таковой на взморье. Средние значения нитратов на поверхности мелководной части бухты примерно в 2 раза превышали их величины в глубоководной части и в 15 раз на взморье. Такое превышение, по-видимому, было возможно вследствие влияния талых, ливневых и паводковых вод р. Балаклавки в вершине бухты (табл. 2), а также в результате слабого водообмена с открытой частью моря.

В придонном слое максимальное содержание нитратов (226 мкг/л), отмеченное в мелководной части бухты, снизилось относи-

тельно поверхности (1385 мкг/л) в 6 раз, в глубоководной части бухты – от 10 (ст. 2) до 17 раз (ст. 3), на взморье – в 4 раза. Средние концентрации нитратов в придонном слое мелководной части остаются высокими (49 мкг/л) и превышают в 2 раза их величины в глубоководной части и в 7 раз на взморье (табл. 1). Уровень средних величин, отмеченный в придонном слое на взморье (7.0 мкг/л), почти не отличался от уровня их содержания в открытых прибрежных водах.

Средние значения нитратов в интервале от 0 до 20 мкг/л, характерном для незагрязнённых вод, имели самый высокий процент повторяемости в районе ст. 4: 76 % на поверхности (рис. 4) и 92 % у дна. В районе ст. 1 в указанном интервале процент повторяемости составлял 8 % на поверхности и 32 % у дна, на ст. 2 и 3 – 20 и 24 % на поверхности и 67 и 71 % в придонном слое соответственно.

Сезонная динамика нитратов так же, как и аммонийного азота, нарушена вследствие влияния паводка р. Балаклавки и таяния снега, в основном, с февраля по апрель, что подтверждается их максимальными величинами на поверхности бухты (рис. 3ж, з). В летний период концентрация нитратов имела минимальные значения.

Фосфаты. Абсолютные пределы колебаний концентрации фосфатов широки: от 0 до 85 мкг/л на поверхности и от 0 до 180 мкг/л в придонном слое. В мелководной части бухты наблюдались максимальные концентрации, на взморье – минимальные (табл. 1). В придонном слое средние величины фосфатов незначительно отличались от средних величин на поверхности. В направлении от мелководья к взморью наблюдается тенденция к уменьшению средних концентраций фосфатов в 2 – 3 раза.

Концентрация фосфатов в интервале 0 – 10 мкг/л, характерная для незагрязнённых прибрежных акваторий, имела наиболее высокий процент повторяемости (от 53 до 84 на поверхности и от 74 до 93 мкг/л в придонном слое) (рис. 4). Весной отмечалось наименьшее

содержание фосфатов. Повышенные значения в тёплое время года, по-видимому, обусловлены сгонными процессами и максимальной антропогенной нагрузкой (табл. 2). Для характери-

стики обеспеченности фитопланктона биогенными элементами приведено классическое отношение минеральных форм азота и фосфора N/P (табл. 3).

Районы	№ ст.	Концентрация, мкг-ат/л					ΣN/P
		NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	ΣN _{мин}	PO ₄ ³⁻	
Поверхность							
Мелководная часть бухты	1	0.35	20.4	1.55	22.3	0.48	46.46
Глубоководная часть бухты	2	0.23	11.6	1.27	13.1	0.34	38.53
	3	0.18	7.71	1.05	8.94	0.26	34.38
Взморье	4	0.09	1.38	0.64	2.11	0.21	10.00
Горизонт 7 м (ст. 1) и 10 м (ст. 2, 3, 4)							
Мелководная часть бухты	1	0.21	3.47	0.87	4.55	0.39	11.67
Глубоководная часть бухты	2	0.10	1.35	0.70	2.15	0.33	6.51
	3	0.09	1.12	0.64	1.85	0.26	7.17
Взморье	4	0.07	0.50	0.54	1.11	0.15	7.40

Табл. 3 Средние концентрации неорганических форм азота и фосфора и их отношение в Балаклавской бухте
Table 3 Average concentration of nitrogen and phosphorus mineral forms and their ratio in the Balaklava Bay

Представленные данные позволили определить существенное отклонение от стехиометрического (16) величин отношения минеральных форм азота к фосфору в различных районах бухты. Отношение N/P снижается, в основном, по мере продвижения из загрязнённой мелководной части бухты к взморью. Величины отношения N/P, рассчитанные для поверхности бухты, превышали оптимальное и имели значения от 46 до 34 единиц, что подтверждает лимитирующую роль фосфора на поверхности бухты. Величины отношения N/P для придонного слоя бухты и взморья были ниже оптимального, изменяясь от 6 до 11 единиц, что свидетельствует о лимитирующей роли азота в придонном слое бухты и на взморье.

Кремний. Концентрация кремния изменялась от 25 до 1372 мкг/л на поверхности и от 24 до 544 мкг/л в придонном слое (табл. 1). Максимальные величины на поверхности мелководной и глубоководной частей бухты в 2 – 3 раза превышали их значения в придонном слое, что противоречило классическому распределению, когда с глубиной концентрация кремния должна повышаться. Это указывает на загрязнение поверхностного слоя пресными стоками различного происхождения. К примеру, концентрация кремния во время таяния снега в

марте 2004 г. в районе ст. 2 достигала 1372 мкг/л (табл. 2), а в самом ливневом стоке, отобранном нами в апреле 2003 г., – 2249 мкг/л.

Средние за период исследований величины находились в диапазоне 133 – 270 мкг/л на поверхности и 121 – 159 мкг/л в придонном слое. В мелководной и глубоководной частях бухты отмечено уменьшение с глубиной средних величин кремния в 1.7 и в 1.5 раза соответственно. На взморье, благодаря влиянию открытой части моря, концентрации кремния на поверхности и глубине 10 м практически не отличались (табл. 1).

Между величинами солёности и кремнием в мелководной части бухты отмечена обратная связь с максимальным коэффициентом корреляции, равным –0.76. В глубоководной части для этих параметров коэффициент корреляции составил –0.67. Между концентрацией нитратов и солёностью коэффициент корреляции в глубоководной части бухты достиг максимальной величины, равной –0.75, в мелководной части бухты он был равен –0.60. Полученные коэффициенты корреляции достоверны при уровне значимости $\alpha=0.05$ и числе степеней свободы $n=71$, т. к. их абсолютные значения гораздо больше критического $r=0.23$ согласно табл. 11 в [15]. Отрицательные коэффи-

циенты корреляции между солёностью и биогенными веществами, полученные для мелководной и глубоководной частей бухты, подтверждают влияние пресных вод различного происхождения.

Органический азот и фосфор. Определение органических форм азота и фосфора проводилось только на поверхности. Величины органического фосфора колебались в мелководной части бухты от 0 до 55 мкг/л, в глубоководной – от 0 до 32 мкг/л, на взморье – от 2 до 85 мкг/л. Средние значения составляли соответственно 14.5, 15.9 и 18.5 мкг/л. Повышенные значения $P_{\text{орг}}$ в районе ст. 4 обусловлены влиянием выпуска неочищенных хозяйственно-бытовых сточных вод Балаклавы. Максимально высокие значения органического фосфора (67 мкг/л) наблюдали в период проведения в бухте дноуглубительных работ.

Наиболее изменчивой в исследуемый период была концентрация органического азота: от 19 до 30100 мкг/л. Экстремальные величины отмечали в январе – марте 2002 г. в период таяния снега, что связано с поступлением органического азота со всей водосборной площади, в т. ч. с сельскохозяйственных (табл. 2). Средние значения органического азота в исследуемый период равномерно понижались от 932 мкг/л – на мелководной ст. 1. до 706 мкг/л на глубоководной ст. 4.

Фито- и меропланктон. В фитопланктоне обнаружено 110 видов микроводорослей. По количеству видов доминировали диатомовые (54%) и динофитовые (32%). Доля примнезиевых, сине-зелёных и других групп водорослей была незначительна. Численность фитопланктона изменялась от 580 тыс. до 84 млрд. кл./м³, биомасса – от 4.6 мг до 2.8 г/м³ соответственно. В зимний период доминировали диатомовая *Skeletonema costatum* (Grev.) и примнезиевая *Emiliana huxleyi* (Loh.) водоросли. В весенний период наблюдался активный рост диатомовых водорослей *Proboscia alata* (Brightw.) и *Pseudosolenia calcaravis* (M. Schultze). Со стоком р. Балаклавы в бухту попадала диато-

мовая водоросль *Pseudonitzhia inflatula* (Hasle), которая затем локализовалась в кутовой части бухты. В пробах, отобранных в районе выпуска сточных вод, обнаружены цианобактерии (*Spirulina* sp.), развитие которых обусловлено дополнительным поступлением минерального фосфора на взморье со сточными водами.

Выявлено влияние прибрежного апвеллинга на развитие фитопланктона в Балаклавской бухте. Например, в июне 2006 г. апвеллинг был зафиксирован по снижению температуры на поверхности в кутовой части бухты до 12.8°C, в глубоководной и на взморье до 11.0 и 12.1°C соответственно. Выход на поверхность холодных вод вызвал появление холодолюбивой *Emiliana huxleyi*. На взморье её численность равнялась 500 млн. кл./м³, в глубоководной части бухты – 1 млрд. кл./м³, что составляло 55 и 91 % от общей численности фитопланктона. В мелководной части доминировала диатомовая водоросль *Chaetoceros socialis* (Lauder) – 400 млн. кл./м³, что составило 80% от общей численности. Подтверждением апвеллинга служит повышение концентрации нитратов от 84 в глубоководной части бухты до 165 мкг/л в мелководной.

Ещё один пример прибрежного апвеллинга, вызванного в июне 2007 г. действием северного ветра со скоростью до 8 м/с. Температура на поверхности упала за сутки на 8°C, а солёность увеличилась на 1.2‰. В фитопланктоне доминировала холодолюбивая *Emiliana huxleyi*, в глубоководной части она составляла 60 %, а в кутовой – до 75 % от общей численности. Явление апвеллинга подтверждалось повышением концентраций нитратов до 65 мкг/л (ст.1), азота аммонийного до 40 мкг/л (ст. 4) и понижением величины рН до 8.15 (ст. 1).

Результаты предшествующих исследований показали, что около 20% от общей численности зоопланктона в бухте составляли пелагические личинки донных беспозвоночных – меропланктон, доля которого в среднегодовой биомассе зоопланктона изменялась от 29 % в кутовой части до 33 % на взморье [4].

В период исследований в Балаклавской бухте обнаружены пелагические личинки 63 видов 42 семейств донных беспозвоночных. Видовой состав меропланктона изменялся по месяцам и зависел от температуры воды. Минимальное число видов (6) отмечено зимой и в начале весны при температуре воды 7.0 – 8.0°C, максимальное (36) – в тёплый период года в температурном диапазоне от 15 до 23°C. По численности в весенний и осенний сезоны доминировали пелагические личинки толерантных видов: двустворчатого моллюска *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck) и усонного рака *Amphibalanus improvisus* (Darwin), а летом – *Mytilaster lineatus* (Gmelin). Полученные нами данные, в основном, подтверждают более ранние результаты [10, 21]. Личинки многощетинковых червей встречались в планктоне постоянно, их видовой состав и численность увеличивались в период с мая по октябрь. Личинки брюхоногих моллюсков преобладали только в летний период и достигали максимальных значений при нересте *Bittium reticulatum* (Da Costa). На структуру фито- и меропланктона существенное влияние оказывали гидродинамические процессы.

В июне 2004 г. во время апвеллинга, отмеченного по понижению температуры воды до 13°C, численность меропланктона в кутовой части не превышала 43 экз./м³, в глубоководной – 36. В июле температура воды понизилась до 8°C, в планктоне отсутствовали личинки характерных для этого месяца *M. lineatus*, *B. reticulatum*, *R. parva*. В кутовой части бухты личинки донных беспозвоночных обнаружены не были, в глубоководной отмечены пустые створки личинок двустворчатых моллюсков.

Влияние хозяйственной деятельности на экологическое состояние Балаклавской бухты зафиксировано нами в 2004 г. В ходе дноуглубительных и гидростроительных работ по благоустройству набережной были разрушены места обитания многих видов беспозвоночных, произошло взмучивание вод и вторичное загрязнение водного слоя, что привело к измене-

нию его гидрохимического режима. Это подтверждается повышением среднегодовой концентрации кремния за 2004 г. до максимальной величины (450 мкг/л). В это же время содержание нитратов (410 мкг/л) превышало в 1.7 раза среднюю величину за весь период исследований, азота органического (1520 мкг/л) – в 1.6, фосфора органического (21 мкг/л) – в 1.5 раза. Увеличение содержания органического вещества привело к дополнительному расходу кислорода и снижению его величин ниже нормального: 97.2 в 2005 и 98.2 % в 2006 гг. Заметим, что в период проведения дноуглубительных работ численность меропланктона в кутовой части бухты снизилась до 500 экз./м³, тогда как в предыдущие годы достигала 2 тыс. экз./м³. Особенно это коснулось личинок десятиногих раков, численность которых не превышала 9 экз./м³ по сравнению с 66 экз./м³ в предыдущие годы. После завершения гидростроительных работ численность меропланктона восстановилась до 2.5 тыс. экз./м³, в основном, за счёт личинок доминирующих видов-образователей *M. lineatus* и *A. improvisus*.

Оценка уровня трофности. Для оценки экологического состояния вод Балаклавской бухты на основании данных полученных во время комплексного мониторинга были рассчитаны величины индекса эвтрофикации E-TRIX для различных частей бухты. В табл. 4 представлены трофические категории морских вод в зависимости от величин E-TRIX [22].

Расчеты показали, что абсолютные значения E-TRIX в бухте изменялись от 0.96 до 5.36. Широкий диапазон этих величин, очевидно, связан как с природными, так и с антропогенными факторами. В среднем по акватории бухты диапазон индекса эвтрофикации составлял 1.66 – 4.00. Максимальные значения E-TRIX приурочены к кутовой части бухты, минимальные – на взморье. Внутригодовой ход величин E-TRIX в водах бухты (рис. 6) аналогичен сезонным изменениям нитратного и аммонийного азота: высокие значения в весенне-летний период, низкие – зимой и осенью.

Величина E-TRIX	Трофические категории
< 4	низкий трофический уровень
4 – 5	средний трофический уровень
5 – 6	высокий трофический уровень
6 – 10	очень высокий трофический уровень

Табл. 4 Качество морских вод в зависимости от E-TRIX

Table 4 Marine waters quality by E-TRIX

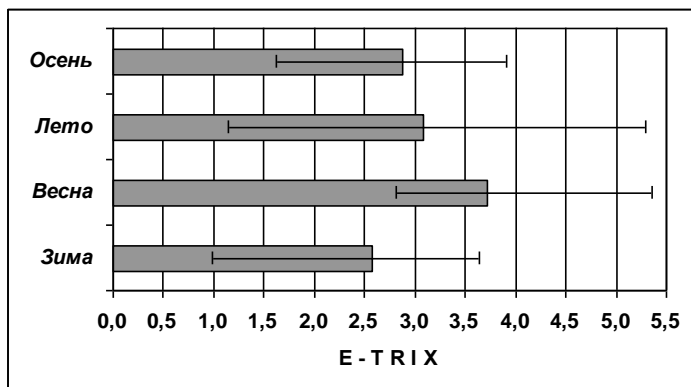


Рис. 6 Сезонная динамика E-TRIX в водах Балаклавской бухты

Fig. 6 E-TRIX season dynamics in Balaklava

Выводы. 1. В мелководной части Балаклавской бухты отмечены максимальные концентрации биогенных веществ, минимальное содержание кислорода, величин рН и солёности. Наблюдалось превышение предельно-допустимых концентраций по величинам БПК₅ (3.36мг/л) и азоту нитритному (25 мкг/л). Обнаружена обратная связь между солёностью и кремнием и между солёностью и нитратами с коэффициентами корреляции равными -0.76 и -0.60 соответственно. Отмечено снижение количества видов меропланктона с 63 до 45 и отсутствие личинок некоторых видов донных беспозвоночных. Согласно значениям индекса эвтрофикации (> 5.0), уровень трофности в водах мелководной части бухты можно классифицировать как высокий. **2.** С продвижением от мелководной части бухты к взморью проис-

ходило снижение концентраций биогенных веществ и величин БПК₅, повышение кислорода, величин рН и солёности. По величинам индекса эвтрофикации (< 4.0) глубоководная часть бухты характеризовалась низким уровнем трофности. **3.** Прибрежный апвеллинг выравнивал величины гидрохимических показателей как по вертикали, так и по горизонтали. В тёплый период года отмечено влияние апвеллинга на структуру фито- и меропланктона. В фитопланктоне появлялись холодолюбивые диатомовые и кокколитовые водоросли. Пелагические личинки донных беспозвоночных выносились с водными массами в открытое море, что приводило к резкому снижению их численности в бухте.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Л. В. Стельмах за предоставленные данные по содержанию хлорофилла «а» и А. О. Лисицкому за техническую помощь при отборе проб.

1. Ациховская Ж. М., Субботин А. А. Динамика вод Балаклавской бухты и прилегающей акватории Черного моря // Экология моря. – 2000. – Вып. 50. – С. 5 – 8.
2. 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.
3. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. Изменчивость солёности поверхностных вод в прибрежной зоне Южного берега Крыма // Экологическая без-

опасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2005. – Вып.12 – С. 22-28.

4. Загородняя Ю. А., Павловская Т. В., Морякова В. К. Современное состояние зоопланктона у берегов Крыма // Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (черноморский сектор). – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – С. 49 – 83.
5. Зац В. И., Лукьяненко О. А., Яцевич Г. В. Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – 120 с.

6. Зима В. В., Шаповалов Ю. И., Щетинин Ю. Т. Результаты опытной эксплуатации автономного гидрозона МГИ-4117 // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2000. вып. – С. 334 – 338.
7. Киселева М. И., Просвиров Ю. В. Изменения структуры бентосного сообщества в районе Балаклавы (Крым, Черное море) // Экология моря. – 2006. – Вып. 72. – С. 14 – 20.
8. Ковригина Н. П., Попов М. А., Лисицкая Е. В., и др. Оценка антропогенного воздействия и сточно-нагонных явлений на экологическое состояние вод Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2003. – Вып. 8. – С. 105 – 114.
9. Куфтаркова Е. А., Ковригина Н. П., Родионова Н. Ю. Гидрохимическая характеристика вод Балаклавской бухты и прилегающей к ней прибрежной части Черного моря // Гидробиол. журн. – 1999. – 35, №3. – С.88 – 99.
10. Лисицкая Е. В. Видовой состав и сезонная динамика численности меропланктона Балаклавской бухты // Экология моря. – 2006. – Вып. 71. – С. 100 – 104.
11. Лисицкая Е. В. Меропланктон Балаклавской бухты (Крым, Чёрное море) // Гидробиол. журн. – 2010. – 46, № 3. – С.29– 38
12. Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. – М.: ВНИРО, 1988. – 119 с.
13. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В. Санитарно-биологические аспекты экологии сева-стопольских бухт в XX веке. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – 185 с.
14. Муравьева И. П. Сравнительная характеристика видового и химического состава макрофитооб-растаний Балаклавской бухты (Черное море) // Эколо-гия моря. – 2007. – Вып. 73. – С. 60 – 63.
15. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистики. М.: Изд-во «Финан-сы и статистика, 1982. – 271 с.
16. Овсяный Е. И., Котельянец Е. А., Орехова Н. А. Мышьяк и тяжелые металлы в донных отложе-ниях Балаклавской бухты (Черное море) // Морск. гидрофиз. журн. – 2009. – № 4. – С. 67 – 80.
17. Попов М. А., Чепыженко А. И., Еремин И. Ю. Оценка источников загрязнения вод Балаклав-ской бухты гидрооптическими методами в осен-ний период // Экологическая безопасность при-брежной и шельфовой зон и комплексное ис-пользование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2005. - Вып. 12. – С. 202 – 207.
18. Попов М. А., Мыкало Ю. Н. Характеристики тер-мохалинного поля вод Балаклавской бухты во время ветрового апвеллинга 22 июня 2007 г. // Системы контроля окружающей среды. – Сева-стополь, 2007. – Вып. 8. – С. 217 – 219.
19. Руководство по гидрологическим работам в оке-анах и морях. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 725 с.
20. Фомин В. В., Репетин Л. Н. Численное модели-рование ветровых течений и распространение примеси в Балаклавской бухте // Морск. гидро-физ. журн. – 2005. – № 4. – С. 43 – 58.
21. Шалаева Е. А., Лисицкая Е. В. Сезонная дина-мика численности личинок массовых видов-образователей в планктоне Балаклавской бухты Черного моря (2000 - 2001 гг.) // Биология моря. – 2004. – 30, № 6. – С. 432 – 439.
22. Vollenveider R. A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters, with special reference to the NW Adriatic Sea. // Proposal for a trophic scale, turbiditi and generalized water quality index. – 1998. – № 9. – Environmetrics. – P. 329 – 357.

Поступила 11 января 2010 г.

После переработки 23 июня 2010 г.

Комплексний моніторинг вод Балаклавської бухти (Чорне море) в період 2000 – 2007 рр. Н. П. Ковригіна, М. О. Попов, О. В. Лисицька, Є. А. Куфтаркова, В. І. Губанов. Представлено просторово-часову мінливість гідролого-гідрохімічних і гідробіологічних показників в Балаклавській бухті на основі моніторингу 2000 – 2007 рр. По величинам E-TRIX дано оцінку трофічного рівня вод: мілководна частина бухти має високий (> 5.0) рівень трофності, глибоководна – низький (< 4.0). Показано вплив прибережного апвелінгу на структуру фіто і меропланктону в теплий період року.

Ключові слова: Балаклавська бухта, термохаліна структура, кисень, біогенні речовини, індекс евтрофікації E-TRIX, апвелінг, фітопланктон, меропланктон.

Complex monitoring of Balaklava Bay (Black Sea) in 2000 – 2007. N. P. Kovrigina, M. A. Popov, E. V. Lisitskaya, E. A. Kufarkova, V. I. Gubanov. The paper presents an existential-temporal variability of hydrological, hydrochemical and hydrobiological parameters in Balaklava Bay on the basis of 2000 – 2007 monitoring.. The estimation of waters trophic level is given on the basis of E-TRIX values: a shallow part has a high (> 5.0) trophic level and a deep part – a low (< 4.0) one. Influence of coastal upwelling on structure phyto- and meroplankton during the warm period of year.

Key words: Balaklava Bay, thermohaline structure, oxygen, nutrients, E-TRIX eutrophication index, upwelling, phytoplankton, meroplankton.