

П.Д.Ломакин*, М.А.Попов**

**Морской гидрофизический институт, г.Севастополь*

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

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОД БАЛАКЛАВСКОЙ БУХТЫ

На основе анализа литературных сведений; массивов эмпирических данных, накопленных в Институте биологии южных морей и Морском гидрофизическом институте в ходе выполнения мониторинговых океанологических исследований в 2000 – 2010 гг., а также модельных экспериментов, оценена степень современного загрязнения вод различных участков акватории Балаклавской бухты. Рассмотрены экологические последствия длительного базирования в бухте военного флота СССР. Выявлены закономерности распространения загрязняющих веществ от реальных источников и на качественном уровне оценены современные межгодовые тенденции показателей загрязнения вод. Апробирован и предложен метод контроля качества вод Балаклавской бухты. Рекомендованы меры по оздоровлению экологической ситуации ее водной экосистемы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *мониторинговые исследования, степень загрязнения, индекс эвтрофикации E-TRIX, контроль качества вод, Балаклавская бухта..*

В течение длительного времени Балаклавская бухта, уникальный в природном отношении участок черноморского побережья [1], подвергалась мощному антропогенному прессу.

Так, согласно [2], с начала XIX ст. берег северной мелководной (кутовой) части бухты активно переустраивался в набережную с причальными сооружениями. В течение двух последних столетий природная округлая форма берега здесь искусственно выпрямлялась. Около 80 % береговой линии этой части бухты было превращено в причальную стенку. Углубленное до 7 – 8 м вдоль уреза воды дно приобрело корытообразную форму. Пляж и остров у западного берега мелководной части, которые представлены на плане 1854 г., были уничтожены из навигационных соображений. Эти формы не существуют как минимум с 1944 г. Вдоль осевой линии бухты был прорыт и постоянно углублялся фарватер.

Во время Холодной войны в Балаклаве, в отроге горы Таврос, был построен подземный комплекс (объект 825 ГТС) площадью около 15 тыс. м², предназначенный для укрытия подводных лодок, их докового ремонта и восстановления. Подземное сооружение, построенное в 1952 – 1963 гг., состояло из нескольких автономных объектов: судоремонтного завода с сухим доком; минно-торпедной части; ремонтно-технической базы для хранения, сборки и выдачи боеприпасов, в том числе и с ядерными боеголовками.

Объекты комплекса были разделены насквозь прорезающим гору и свободно связанным с морем через два батопорта каналом. Вход в канал через южный мористый батопорт (штольня) располагался в юго-западной мористой области бухты. У западного берега ее кутовой части находился другой северный батопорт. Размеры канала: длина 608 м, ширина – от 10 до 24 м,

© П.Д.Ломакин, М.А.Попов, 2014

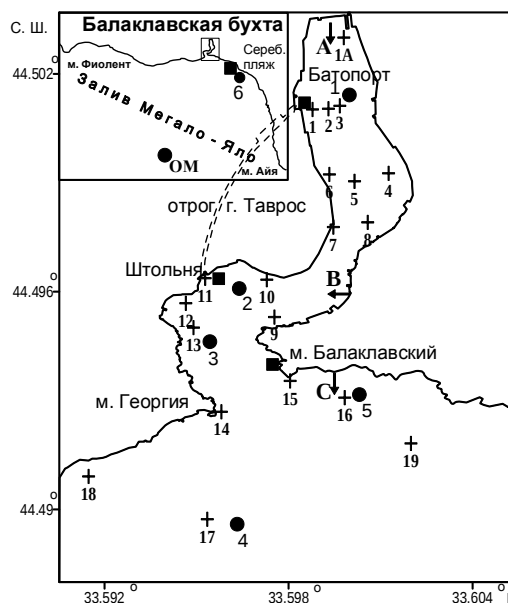


Рис. 1. Схема района исследования: ● – гидрохимические станции, + – СТД-зондирования и гидрооптические станции, ■ – места отбора мидий. Стрелками обозначены действующие источники загрязнения: А – выпуск сточных вод г.Балаклава; В – ливневый сток; С – выпуск сточных вод завода «Металлист». Пунктиром показан водный канал объекта 825 ГТС.

глубина 8 м (рис.1).

В 90-е гг. прошлого столетия военный комплекс был закрыт и переоборудован в музей [3].

Очевидно, что сооруженный в бухте военный комплекс и базировавшийся здесь военный флот СССР представляли собой мощ-

ные источники загрязнения. Степень их воздействия на экосистему Балаклавской бухты в то время вряд ли определялась, а если таковые попытки и осуществлялись, то открытая информация относительно их результатов отсутствует.

Сейчас в бухте постоянно действуют несколько источников загрязнения. В ее кутовую мелководную часть выведен коллектор сточных вод завода «Металлист». Сюда же впадает речка Балаклавка, несущая сточные воды с территории своего водосбора, содержащие продукты химической обработки виноградников и полей. На восточном берегу узкости, соединяющей мелководную кутовую и открытую мористую области Балаклавской бухты, расположен выход ливневого стока. Вдоль берегов кутовой части и узкости находятся активно эксплуатируемые причалы и якорные стоянки судов. В мористую юго-восточную область бухты выведен коллектор хозяйственно-бытовых сточных вод г.Балаклава (рис.1).

С начала 90-х гг. прошлого столетия были продолжены прерванные почти на 40 лет в связи с базированием военного флота СССР, а, по сути, только начаты комплексные океанологические исследования этого участка черноморского побережья.

В предлагаемой статье представлен результат обобщения серии публикаций, подготовленных, в основном, сотрудниками Института биологии южных морей НАН Украины и Морского гидрофизического института НАН Украины (в том числе и авторами настоящей работы) в течение последнего десятилетия, которые касаются проблемы загрязнения вод рассматриваемой акватории. Также проанализированы новые сведения, дополняющие и расширяющие сложившиеся представления о факторах антропогенного влияния на экосистему бухты и их последствиях. Оценена степень современного загрязнения акватории бухты. Мы также попытались определить межгодовые изменения показателей качества ее вод. Апробирован и предложен метод контро-

ля антропогенной нагрузки и количественной оценки ее межгодовых тенденций. Рекомендованы меры по оздоровления экологической ситуации.

Исходные данные и методы исследования. В качестве исходной информации нами использованы мониторинговые гидрофизические, гидрооптические, гидрохимические и гидробиологические наблюдения, проводившиеся с 2000 по 2010 гг. на полигоне, включающем акваторию Балаклавской бухты и небольшой примыкающий к ней участок открытого моря, залив Мегало Яло, расположенный между мысами Фиолент и Айя (рис.1).

Наблюдения за гидрофизическими и гидрооптическими параметрами среды выполнялись в зондовом режиме на 19 станциях, равномерно покрывавших интересующий участок черноморского побережья.

Экспериментальные гидрохимические исследования регулярно проводились на четырех станциях (ст.1 – 4), расположенных, примерно, вдоль осевой линии бухты (станции, помеченные черными кружками на рис.1). Они охватывали мелководную ее часть (ст.1, глубина 7 – 8 м), глубоководную (ст.2 и 3, глубины 20 и 15 м) и взморье (ст.4, глубина 60 м). Практически ежемесячно на этих станциях с поверхности и с горизонта ~10 м батометром БМ-48 отбирались пробы на гидролого-гидрохимический анализ. Полученные таким образом эмпирические данные – единственная в настоящее время выборка регулярных наблюдений, позволившая авторам работ [4, 5] выявить закономерности структуры и сезонного хода основных гидрохимических параметров среды; определить факторы и степень загрязнения верхнего 10-метрового слоя вод.

На ст.1А, 5 и 6 гидрохимические наблюдения проводились эпизодически. Ст.1А (глубина 4 – 5 м) выполнялась в крайней северной точке бухты; ст.5 (глубина 10 м) – непосредственно в зоне выхода сточных хозяйственно-бытовых вод у канализационного коллектора г.Балаклава; ст.8 (глубина 10 м) – у Серебряного пляжа, на участке открытого побережья.

Для сравнения показателей качества загрязненных вод Балаклавской бухты и прибрежных относительно чистых вод открытого моря привлечены архивные гидрохимические наблюдения последних ~11 лет в районе юго-западного побережья Крыма, между мысами Фиолент и Айя, над глубинами 100 – 200 м, которые были выкопированы из банка океанологических данных МГИ НАНУ. В результате их обработки для горизонтов 0, 10, 20 м был получен набор элементарной статистики и построены осредненные кривые вертикального распределения гидрохимических элементов. Соответствующие профили, приведенные к условной станции ОМ (открытое море), использованы в качестве фона, отражающего структуру полей гидрофизических элементов в чистых прибрежных водах Черного моря (рис.1).

В комплекс гидрохимических параметров входили: растворенный кислород, биохимическое потребление кислорода на 5-е сутки (БПК₅), водородный показатель pH, кремний, а также неорганические и органические формы азота и фосфора.

Для определения уровня трофности вод Балаклавской бухты, был выбран индекс эвтрофикации (*E-TRIX*), при расчете которого В.И.Губановым [5] использовались синхронные измерения гидрохимических и гидробиологических характеристик. *E-TRIX* – комплексный показатель качества вод,

функция концентрации растворенного кислорода, общего фосфора, суммы минеральных форм азота и хлорофилла «а», рассчитан по соотношению [6]:

$$E-TRIX = \lg ([Chl] \times [D\%O_2] \times [PT] \times [DIN] \times 1,5)/1,2,$$

где *Chl* – хлорофилл «а», мкг/л; *D%O₂* – отклонение в абсолютных значениях растворенного кислорода от 100 % насыщения; *PT* – общий фосфор, мкг/л; *DIN* – растворенная форма суммы минерального азота, мкг/л.

Представления о загрязнении вод Балаклавской бухты, полученные на основе традиционных гидрохимических наблюдений, удалось существенно расширить, благодаря серии детальных гидрооптических съемок всей интересуемой акватории, выполненных в 2004 – 2010 гг. при помощи зондирующего биофизического комплекса «КОНДОР» [7]. В результате впервые для исследуемого региона были приобретены сведения о таких важных элементах морской среды, как мутность, суммарное взвешенное вещество, растворенное органическое вещество, содержание нефтепродуктов.

Закономерности, касающиеся динамики вод и переноса загрязняющих веществ, рассмотрены по результатам численного моделирования [8, 9] и обобщения данных натурных наблюдений [10].

Съемки Балаклавской бухты в течение интервала времени 2000 – 2010 гг. проводились, практически, ежемесячно с борта 4-х местного яла. Координаты станций определялись при помощи спутниковой навигационной системы GPS-12, GARMIN.

Обсуждение результатов. Современную историю океанологических исследований Балаклавской бухты условно можно разделить на три этапа.

Первый этап – когда в начале 90-х гг. прошлого столетия в Балаклавской бухте были проведены экспедиционные исследования [4, 11 – 16], ориентированные на оценку экологического ущерба, нанесенного ее акватории за время базирования военного флота. Обобщив результаты этих исследований, авторы статей [4, 5, 16] пришли к следующему. За время существования военно-морской базы Балаклавская бухта потеряла свое рыбохозяйственное и, в значительной мере, рекреационное значение. Повсеместно воды бухты характеризовались наличием широкого спектра загрязнителей – нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ, веществ-ксенобиотиков, металлов, биогенных элементов. Спустя десятилетие после демилитаризации, морская среда Балаклавской бухты определялась как грязная [14]. В донных отложениях зафиксировано высокое содержание тяжелых металлов и мышьяка [16]. Отмечено снижение видового состава гидробионтов, бедность видового состава донных сообществ и низкие показатели биомассы, численности, видового разнообразия микробентоса [12]. В биотерыхлых грунтах встречалось лишь 24 % видов от общего видового разнообразия обитающих у берегов Крыма моллюсков [15].

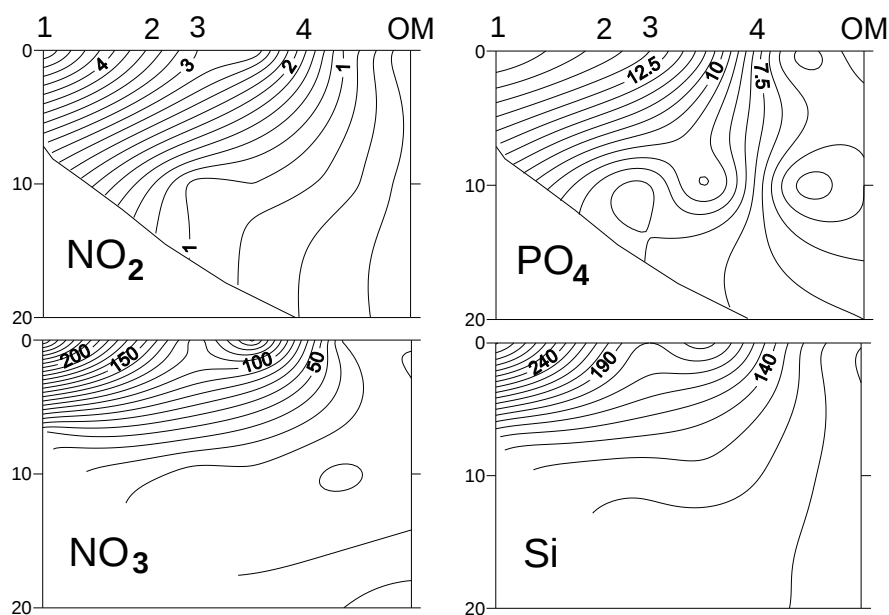
Второй этап изучения состояния вод бухты, с 1991 – 1993 по 2000 – 2002 гг., характеризовался эпизодическими экспериментальными исследованиями. В итоге было выявлено, что за счет вывода военного флота и прекращения судоремонтных работ к началу XXI ст. экологическая ситуация в бухте улучшилась [5].

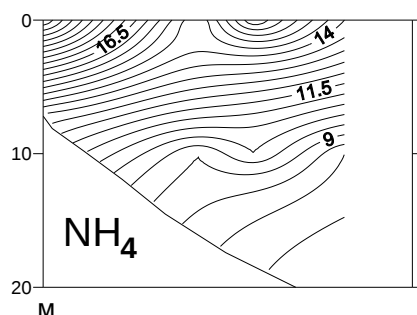
Третий этап выполнялся в ходе регулярных мониторинговых комплексных океанологических исследований в течение одиннадцати лет, с 2000 по

2010 гг. Результаты мониторинговых гидрохимических и гидрооптических исследований, проведенных в это время, позволили выявить особенности вертикальной структуры полей загрязняющих веществ, определить факторы и закономерности их сезонной изменчивости, получить представление о современном уровне загрязнения вод бухты, на качественном уровне оценить межгодовые тенденции степени загрязнения ее вод.

В частности, показано, что наиболее загрязнена мелководная часть Балаклавской бухты, принимающая сточные и ливневые воды. Интенсивная антропогенная нагрузка и ограниченный водообмен способствуют аккумуляции загрязняющих веществ на этом участке. Здесь обнаружено заметное превышение предельно-допустимых концентраций отдельных гидрохимических показателей. От мелководной части к взморью концентрация биогенных веществ и БПК₅ падает, тогда как содержание растворенного кислорода и pH растет.

На рис.2 изображена фоновая вертикальная структура поля основных биогенных элементов, осредненных за временной интервал с 2000 по 2010 гг. для верхнего слоя Балаклавской бухты и прилегающего участка открытого моря, иллюстрирующая современную степень загрязнения ее вод. Виден резкий контраст показателей качества вод в бухте и открытом море. Содержание анализируемых веществ в кутовой части бухты и ее узкости в разы и на порядки превосходит их концентрацию в открытом море (табл.1, 2). Так, для NO_2 это соотношение равно 5, для NO_3 270, для PO_4 3 – 4, для Si 3.





М

Р и с . 2 . Распределение содержания (мкг/л) гидрохимических элементов: NO_2 , NO_3 , NH_4 , PO_4 , Si в слое 0 – 20 м вдоль осевой линии Балаклавской бухты, от кутовой части до открытых вод. Интервал осреднения 2000 – 2010 гг.

Т а б л и ц а 1 . Изменчивость содержания гидрохимических элементов в Балаклавской бухте за время наблюдений с 2000 по 2010 гг. Здесь, как и в табл.2, представлен набор статистических характеристик по каждому элементу: в числителе – экстремальные концентрации, в знаменателе – средние с интервалом стандартного отклонения.

№ ст.	H, м	NO_2	NO_3	NH_4	PO_4	Si
1	0	$\frac{0 \div 25}{5 \pm 2}$	$\frac{4 \div 1385}{270 \pm 182}$	$\frac{1 \div 201}{21 \pm 13}$	$\frac{2 \div 85}{15 \pm 8}$	$\frac{7 \div 2249}{301 \pm 232}$
2	0	$\frac{0 \div 30}{3 \pm 2}$	$\frac{1 \div 1290}{153 \pm 93}$	$\frac{1 \div 136}{17 \pm 9}$	$\frac{1 \div 72}{11 \pm 7}$	$\frac{6 \div 1372}{193 \pm 97}$
3	0	$\frac{0 \div 11}{3 \pm 1}$	$\frac{0 \div 995}{104 \pm 68}$	$\frac{1 \div 59}{14 \pm 5}$	$\frac{0 \div 315}{13 \pm 11}$	$\frac{9 \div 1290}{180 \pm 83}$
4	0	$\frac{0 \div 6}{1 \pm 0,5}$	$\frac{0 \div 191}{18 \pm 9}$	$\frac{0 \div 212}{14 \pm 11}$	$\frac{0 \div 63}{6 \pm 4}$	$\frac{10 \div 479}{126 \pm 29}$
1	7	$\frac{0 \div 8}{3 \pm 0,5}$	$\frac{0 \div 226}{46 \pm 27}$	$\frac{1 \div 73}{13 \pm 8}$	$\frac{0 \div 180}{12 \pm 10}$	$\frac{28 \div 493}{152 \pm 32}$
2	10	$\frac{0 \div 10}{1 \pm 0,4}$	$\frac{0 \div 130}{18 \pm 9}$	$\frac{0 \div 32}{10 \pm 6}$	$\frac{0 \div 134}{9,5 \pm 7}$	$\frac{16 \div 544}{127 \pm 34}$
3	10	$\frac{0 \div 6}{0,9 \pm 0,3}$	$\frac{0 \div 57}{15 \pm 7}$	$\frac{0 \div 50}{9 \pm 4}$	$\frac{0 \div 93}{8 \pm 6}$	$\frac{17 \div 395}{124 \pm 23}$
4	10	$\frac{0 \div 5}{0,7 \pm 0,3}$	$\frac{0 \div 44}{7 \pm 4}$	$\frac{0 \div 40}{8 \pm 3}$	$\frac{0 \div 102}{5,5 \pm 3}$	$\frac{5 \div 412}{114 \pm 25}$

Концентрация NH_4 в пределах бухты от кутовой к мористой области уменьшается в 3 раза.

Вертикальное распределение биогенов в водах бухты аномально. Оно характеризуется их высоким содержанием в верхнем слое и резким падением с глубиной, тогда как в смежных с бухтой чистых морских водах вертикальное распределение биогенов – возрастающая функция глубины (рис.2, табл.1, 2). Это указывает на постоянное присутствие в Балаклавской бухте стоковых и сточных вод с высоким содержанием биогенных элементов антропогенного происхождения.

На рис.2 не видно влияние другого мощного источника загрязнения вод Балаклавской бухты – коллектора канализационных вод г.Балаклава. Это объясняется тем, что гидрохимические станции, на которых регулярно проводился полный комплекс наблюдений, расположены на достаточном удалении от точки выпуска (рис.1). Воздействие этого источника на структуру полей загрязняющих веществ более детально удалось разрешить на основе зондовых гидрооптических измерений.

Обнаружена тесная обратная связь между солёностью и кремнием, а также между солёностью и нитратами с коэффициентами корреляции равными – 0,76 и – 0,60 соответственно, что свидетельствует о постоянном присутствии в бухте пресных вод различного происхождения [5].

Т а б л и ц а 2. Изменчивость содержания гидрохимических элементов в открытом море у Балаклавской бухты (станция ОМ). Данные по NH_4 отсутствуют.

$H, м$	NO_2	NO_3	PO_4	Si
0	$0 \div 9$ $0,2 \pm 0,04$	$0 \div 184$ 12 ± 4	$0 \div 30$ 6 ± 3	$45 \div 471$ 101 ± 53
10	$0 \div 10$ $0,3 \pm 0,1$	$0 \div 114$ 18 ± 4	$0 \div 23$ 6 ± 3	$30 \div 473$ 103 ± 54
20	$0,4 \div 15$ $0,3 \pm 0,1$	$0 \div 350$ 37 ± 9	$0 \div 24$ 7 ± 3	$62 \div 465$ 107 ± 66

Факт биологического загрязнения сточными водами акватории бухты на количественном уровне также подтверждается тесной обратной корреляционной связью между солёностью и содержанием растворенного органического вещества. В кутовой части бухты и ее узкости коэффициент корреляции между этими

величинами изменяется в пределах от – 0,64 до – 0,78.

Для мелководной части бухты характерно минимальное содержание кислорода и рН. Отмечено превышение предельно-допустимых концентраций по БПК₅ (3,36 мг/л) и нитритному азоту (25 мкг/л).

За все время наблюдений в толще вод Балаклавской бухты не было зафиксировано ни одного случая дефицита кислорода (содержание менее 2 мл/л). Подобное явление также не известно из литературных источников. Это подтверждает результат исследования динамики вод Балаклавской бухты [8 – 10], согласно которому для рассматриваемой акватории характерны развитая вихревая система течений и мощный вертикальный обмен. Другие значимые динамические факторы, свойственные водам бухты, – локальный

ветровой и крупномасштабный апвеллинг, способствующие природному очищению ее вод [17, 18].

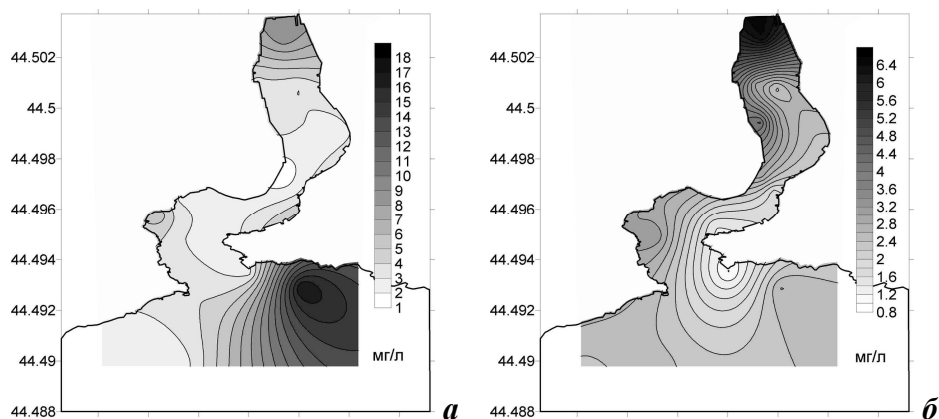
Для сравнения заметим, что, например, по результатам [19], в придонных водах Большой Севастопольской бухты, для которой не типичен апвеллинг и развитая вертикальная циркуляция, дефицит кислорода – довольно частое явление.

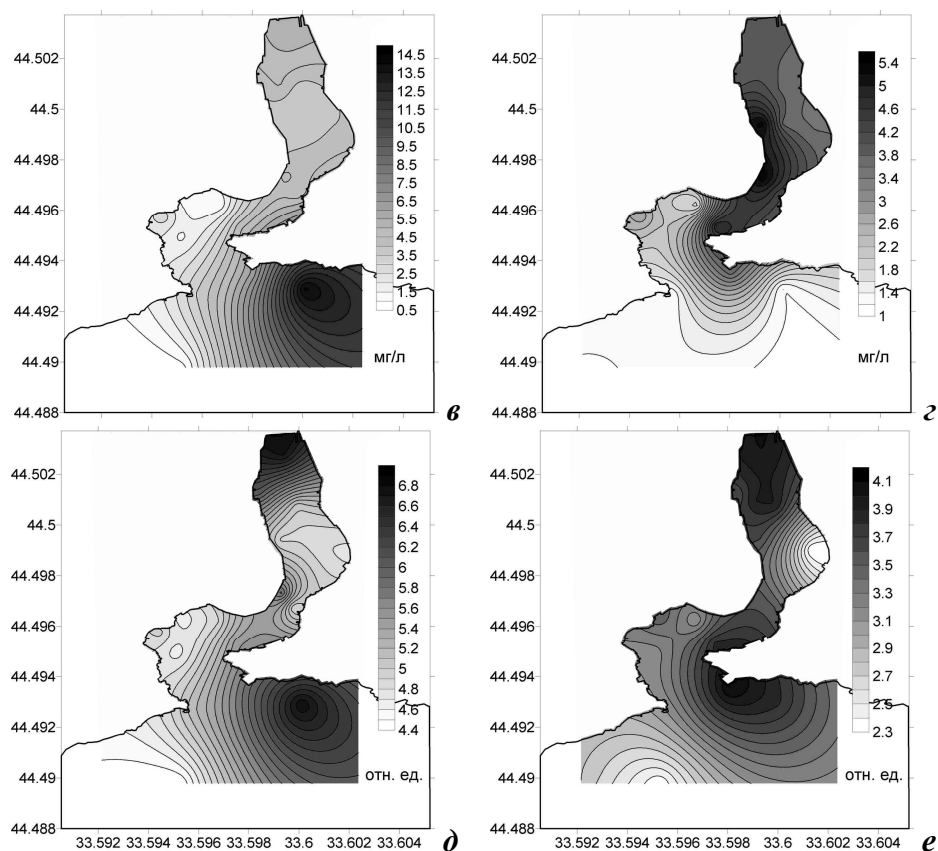
Согласно фактическим значениям индекса эвтрофикации, современный уровень трофности в водах мелководной части бухты классифицируется как высокий (здесь $E-TRIX > 5,0$) и как низкий – в глубоководной ее области, где $E-TRIX < 4,0$ [5].

Благодаря серии оптических съемок [20], выполненным в зондовом режиме по густой сетке станций (рис.1), были получены численные оценки по загрязнению всей рассматриваемой акватории избыточным суммарным взвешенным веществом, растворённым органическим веществом искусственного происхождения (показатель биологического загрязнения) и нефтепродуктами. Выявлены закономерности пространственной структуры поля мутности. Определены концентрации и источники перечисленных выше характеристик.

По этим параметрам среды были обнаружены две наиболее загрязненные области акватории Балаклавской бухты, – ее кутовая часть и участок, локализованный у оголовка выпуска сточных вод г.Балаклава. Здесь зафиксирована значительная мутность и высокая, в десятки раз превосходящая природную норму, концентрация суммарной взвеси и растворенной органики, а также явные признаки нефтяного загрязнения (рис.3). Особо следует отметить локальные максимумы содержания нефтепродуктов, которые постоянно наблюдались вдоль западного и восточного берегов кутовой части и узкости, у причальных линий, в местах якорных стоянок судов (как эксплуатировавшихся ранее, так и ныне действующих), доков, плавмастерских (рис.3).

Для этих же участков береговой линии Балаклавской бухты, согласно [16], свойственно максимальное содержание в донных отложениях тяжелых металлов и мышьяка. Это дает основание полагать, что одним из источников загрязнения вод бухты служит грунт. Данный источник, по-видимому, сформировался во время базирования военного флота и, сейчас подпитывается за счет присутствия в бухте многочисленных, преимущественно, маломерных судов.





Р и с . 3. Распределение общего взвешенного вещества, мг/л (а, б); растворенного органического вещества, мг/л (в, г); нефтепродуктов, у.е. (д, е) в верхнем (а, в, д) и придонном (б, г, е) слоях 23 августа 2006 г.

Согласно [21], повышенные на 2 – 5 % относительно окружающего фона концентрации нефтепродуктов у причальных линий типичны также для бухт Севастополя. Аналогичная закономерность пространственного распределения тяжелых металлов в донных отложениях Большой Севастопольской и Балаклавской бухт выявлена авторами статьи [16]. Это означает, что активно эксплуатируемые причальные линии и якорные стоянки судов аккумулируют загрязняющие вещества в воде и грунте и со временем могут превращаться во вторичные источники загрязнения.

Характерный признак структуры поля концентрации загрязняющих веществ, суммарной взвеси и мутности – ярко выраженная неоднородность по вертикали. В кутовой части Балаклавской бухты загрязнена вся толща вод, от поверхности до дна. В восточной части ее открытой области загрязняющие вещества, поступающие сюда из канализационного коллектора г.Балаклава, аккумулированы в тонком верхнем слое. Здесь их концентрация в десятки раз превышает природный фон. От горизонта 1 – 2 м их содержание резко убывает с глубиной. В подстилающих верхний слой водах и у дна концентрация загрязнителей остается высокой и в разы превосходит их содержание в открытых черноморских водах.

У причальных линий максимум концентрации нефтепродуктов, как правило, сосредоточен у дна.

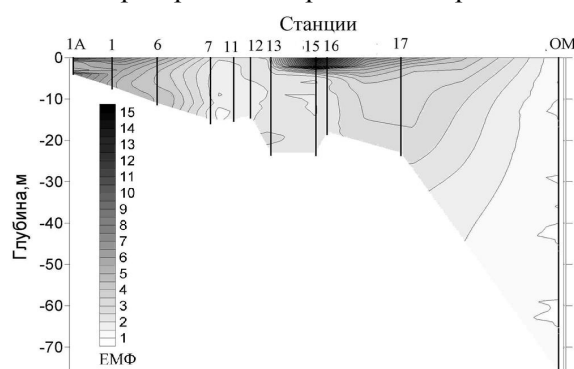
Исследование оптических свойств вод в юго-восточной части бухты показало, что хозяйственно-бытовые стоки г.Балаклава не попадают под основной черноморский пикноклин. Они концентрируются в верхнем слое над скачком плотности и распространяются по всей акватории бухты. Эта особенность проиллюстрирована на (рис.4). Здесь также видны явные различия в поле мутности вод открытого моря и бухты, подтверждающие вывод, сформулированный на основе традиционных гидрохимических наблюдений, согласно которому современный уровень загрязнения Балаклавской бухты высок.

Наиболее интенсивно канализационными стоками г.Балаклава акватория бухты загрязняется при умеренных и сильных ветрах южной четверти, когда у ее восточного берега формируется течение северного направления [9, 10]. Очевидно, что процесс природного очищения попадающих в Балаклавскую бухту сточных вод г.Балаклава при существующих геометрических параметрах системы их выпуска малоэффективен.

Относительно чистые воды, с показателями близкими к природным, свойственны юго-западной области бухты, расположенной к югу от штольни (рис.1). Водная толща здесь отличается минимальной мутностью и содержанием суммарной взвеси, нефтепродуктов и растворенной органики (рис.2 – 4).

Закономерности распространения загрязняющих веществ в Балаклавской бухте при типичных для исследуемого региона ветровых ситуациях выявлены на основе математического моделирования. Моделирование распространения пассивной примеси в условиях маловетрия выполнено в [8], а при умеренном и сильном меридиональном ветре – в [9]. Имитировался процесс распространения загрязняющих веществ в результате их импульсного выпуска одновременно из трех источников: выпуск сточных вод г. Балаклавы; ливневой сток; выпуск сточных вод завода «Металлист» (рис.1). Основным итог этих работ можно обобщить следующим образом.

Распространение примеси от реально существующих в Балаклавской бухте источников в значи-



Р и с . 4 . Распределение мутности (оптические единицы ЕМФ) на разрезе вдоль осевой линии Балаклавской бухты от кутовой части до открытых вод 23 августа 2006 г.

тельной мере определяется ветром, вихревой структурой течений, интенсивной вертикальной циркуляцией, морфометрическими особенностями.

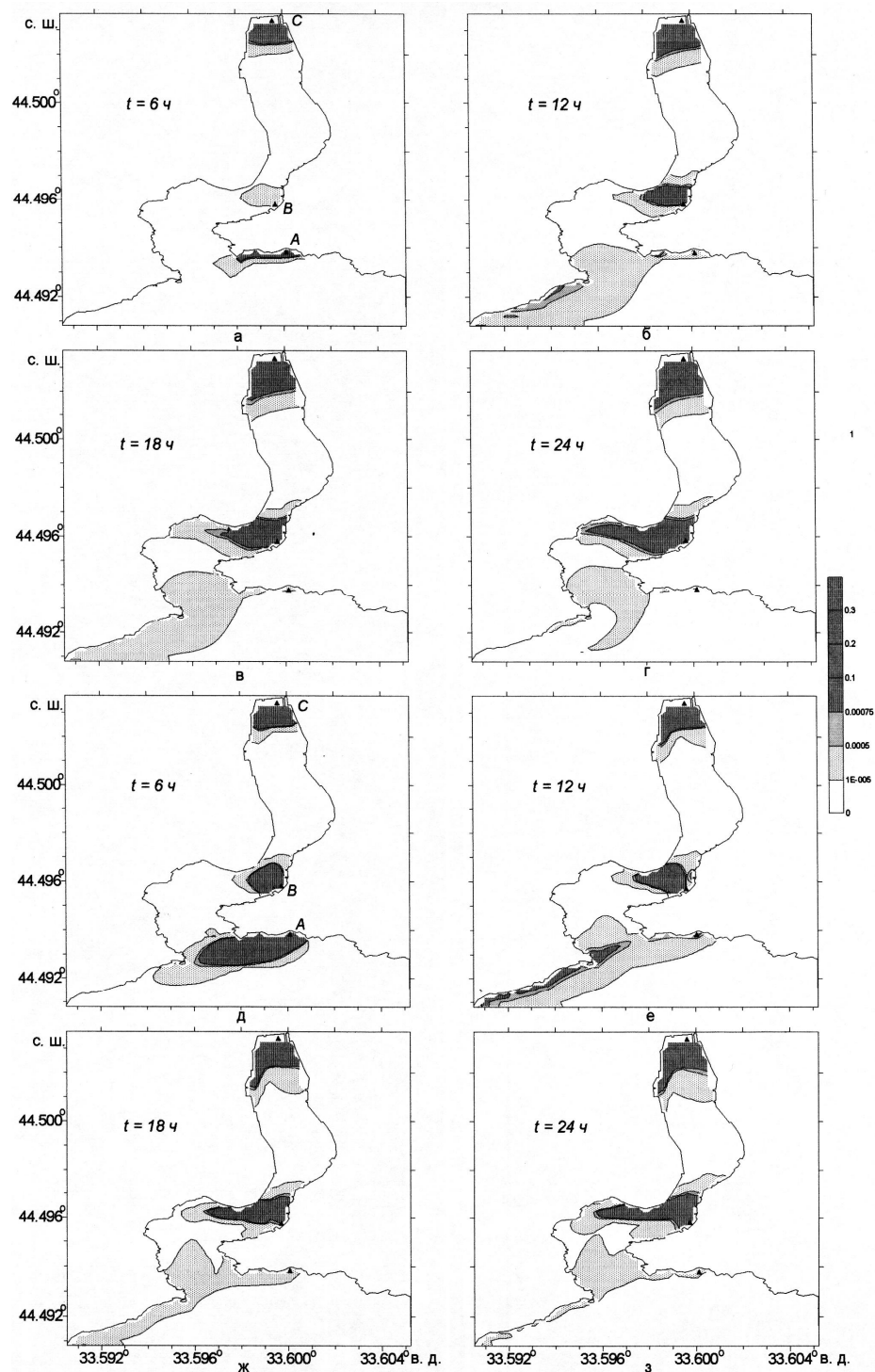
В маловетренную погоду и при зональных ветрах, от которых бухта экранирована горами, в результате одновременного импульсного выпуска загрязнителей из трех основных находящихся в бухте источников, загрязняющие вещества в течение суток

проникают в толщу вод преобладающей части акватории бухты и прилегающего участка открытого моря. При этом превалирует зональный характер распространения загрязнителей. В данной ситуации влияние сточных вод городского коллектора (источник А, рис.1) наиболее значимо, оно распространяется на срединную и мористую области Балаклавской бухты (рис.5).

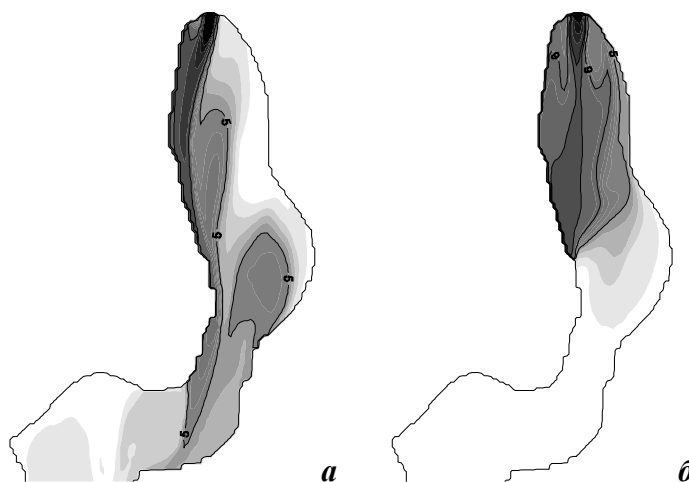
Процесс загрязнения бухты при умеренном и сильном меридиональном ветре протекает гораздо интенсивнее по сравнению с маловетреной погодой. Это иллюстрируют рис.6, 7, заимствованные из [9]. Видно, что как при северном, так и южном ветре скоростью 10 м/с, сточные воды завода «Металлист» и ливневого коллектора в течение 7 – 15 часов проникают на всю внутреннюю акваторию бухты. Сильные и умеренные ветры южной четверти, генерирующие меридионально ориентированные потоки во всей толще вод, способны быстро переносить загрязняющие вещества из мористой области бухты (канализационный выпуск, источник А, рис.1) в ее кутовую часть. Этот эффект подтверждают результаты гидрохимического и гидробиологического анализов отобранных в бухте проб [5].

Имеющаяся в нашем распоряжении эмпирическая выборка по биогенным элементам, статистические характеристики которой приведены в табл.1, не позволяет получить количественные оценки межгодовых тенденций показателей загрязнения вод в Балаклавской бухте. Это связано, как с обеспеченностью выборки, так и с высокой степенью изменчивости анализируемых параметров среды.

Сопоставление элементарного набора статистических сведений, представленных в табл.1 и 2, свидетельствует не только о значительном отличии в содержании биогенов в бухте и открытых водах, но и явном различии интенсивности их изменчивости. Так, показатель абсолютной изменчивости и стандартное отклонение концентрации одних и тех же биогенных элементов в водах бухты существенно выше по сравнению с водами открытой части моря. Это притом, что эти характеристики для открытых вод не приведены



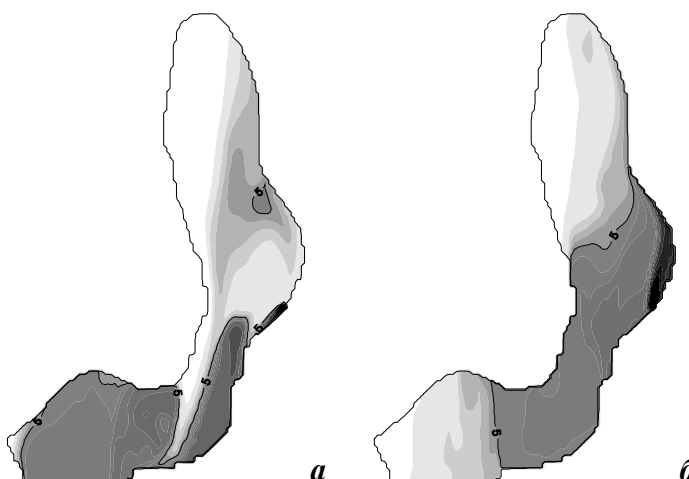
Р и с . 5 . Распределение концентрации загрязняющей примеси в различные моменты времени в верхнем (а – г) и придонном (д – з) слоях при юго-западном ветре скоростью 1 м/с. Треугольниками обозначены места выброса загрязняющих веществ.



Р и с . 6 . Распределение концентрации примеси на поверхности Балаклавской бухты при северном (а) и южном (б) ветрах скоростью 10 м/с после 7 ч действия выпуска завода «Металлист» [9].

к одной точке и, кроме временной, их дисперсия содержит также и пространственную составляющую.

Для получения надежных статистических характеристик, отражающих межгодовые тенденции показателей загрязнения вод Балаклавской бухты, необходимы обеспеченные временные ряды по каждому конкретному текущему месяцу года. Поэтому для выявления интересующих тенденций, частота временных наблюдений на каждой станции за гидрохимическими параметрами и, соответственно, количество экспедиций, должны быть увеличены, примерно, на порядок. Очевидно, что такая задача не выполнима, и продолжать мониторинговые исследования бухты, на основе существующей методики вряд ли целесообразно.



Р и с . 7 . Распределение концентрации примеси на поверхности Балаклавской бухты при северном (а) и южном (б) ветрах скоростью 10 м/с после 15 ч действия выпуска ливневого стока [9].

Ниже рассмотрен апробированный в условиях Балаклавской бухты более эффективный и менее затратный метод [22], использование которого, на наш взгляд, может решить задачу контроля текущего состояния и оценки на количественном уровне межгодовых тенденций качества ее вод.

Авторы цитируемой статьи прибегли к известному методу, применяемому в современных экологических исследованиях, суть которого заключается в выборе организмов, которые могут быть использованы в качестве индикаторов для оценки состояния интересующей экосистемы.

В качестве такого организма для исследуемой акватории была взята мидия *Mytilus galloprovincialis* Lam., ведущая малоподвижный образ жизни. Данный моллюск, состояние которого, как выяснилось, реагирует на длительное антропогенное воздействие, и был принят в качестве тест-объекта водной экосистемы исследуемой акватории.

Ряд физических и биологических параметров субпопуляции мидии, находящейся в течение продолжительного времени в условиях длительного воздействия факторов водной среды, было решено исследовать на участках дна Балаклавской бухты, подверженных различной степени загрязнения.

Для этого в наиболее загрязненных местах, которые были выявлены на основе гидрохимических и гидрооптических исследований: кутовая часть бухты (район у северного батопорта) и участок, примыкающий к канализационному выпуску г.Балаклава (район у мыса Георгиевский); а также в наименее загрязненных местах, – у штольни и вне бухты, в районе Серебряного пляжа, было отобрано, примерно, по 100 экземпляров мидии (рис.1). Затем все моллюски подверглись следующим видам анализа: определены темпы роста и степень деформации их раковин, соотношение полов, и плотность поселения на каждом участке.

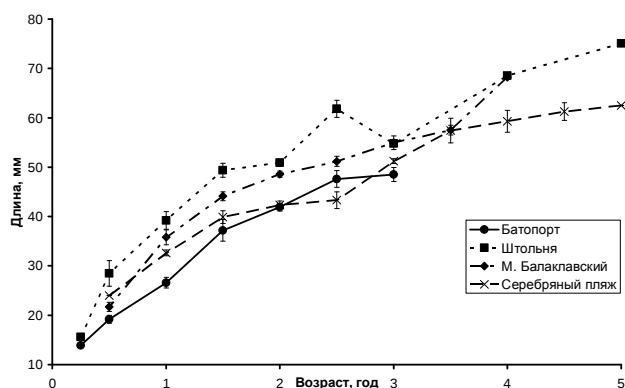
В результате выяснилось, что мидии, обитающие на загрязненных участках, в районе батопорта и м.Георгиевского, отличались патологическими признаками, наиболее ярко выраженными в пробе, отобранной у батопорта. Здесь моллюски выделялись замедленным ростом и ярко выраженной деформацией раковин, низкой плотностью поселения и аномальным соотношением полов (рис.8, 9).

Визуальный анализ грунта в районе батопорта показал, что поселение мидии здесь располагалось на небольшом примыкающем к устью канала участке. На смежных акваториях дно представляло собой пространство серого цвета. Здесь у уреза воды обнаружены разреженные поселения митиластера (*Mytilaster lineatus* Gmelin.) без присутствия мидий.

Известно [23], что *Mytilaster lineatus* (Gmelin.) может развиваться в массе при содержании растворенного в воде кислорода 1 – 3 мг/л, обитать в анаэробных условиях и в течение двух недель находиться без воды при температуре 20 – 24 °С.

Полное отсутствие мидий и наличие лишь единичных экземпляров такого толерантного к неблагоприятным факторам среды моллюска как митиластер свидетельствует о сложной экологической обстановке в северной части бухты.

Канал подводного объекта в данном случае играет положительную экологическую функцию, поставляя относительно чистые воды из юго-западной мористой области бухты в наиболее загрязненную ее кутовую часть. Однако



Р и с . 8 . Зависимость длины раковин мидий от их возраста на участках акватории Балаклавской бухты с различной степенью загрязнения вод [22].

это действие локально и распространяется в диусе нескольких десятков метров.

На участках с чистыми водами, в районах штольни и Серебряного пляжа, патологические отклонения в рассмотренных параметрах состояния мидии отсутствовали.

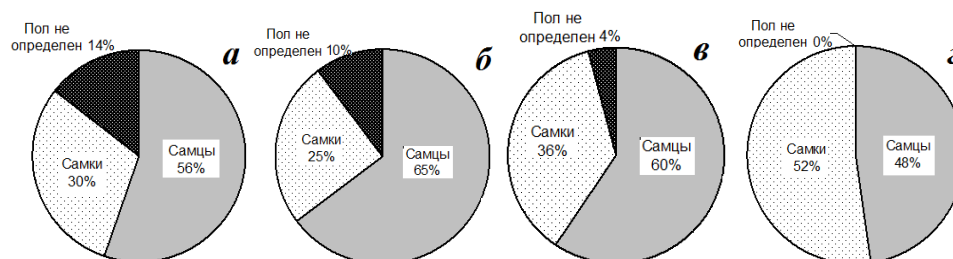
Приведенный выше результат исследования мидии, как тест-объекта, параметры состояния ко-

торого откликаются на степень антропогенной нагрузки, позволяет использовать данный моллюск в качестве индикатора загрязнения вод Балаклавской бухты, а традиционные гидрохимические мониторинговые исследования переориентировать на менее затратный мониторинг уже апробированных характеристик состояния его поселений на соответствующих участках дна. Дискретность рекомендуемых наблюдений за мидией, по предварительной оценке, должна быть, примерно, 2 – 3 раза в год. Более конкретно этот интервал определится в ходе мониторинга.

Полный комплекс гидрохимических наблюдений целесообразно выполнять в случаях экстремального загрязнения бухты, – во время паводков, ливневых осадков, дноуглубительных работ, аварийных разливах и сбросах загрязнителей.

Как показано в тексте настоящей статьи, коллектор канализационных вод г. Балаклава, расположенный у м.Георгиевский на глубине 10 м, – один из наиболее значимых источников загрязнения вод Балаклавской бухты, а существующая система сброса малоэффективна. Очевидно, что пагубное влияние этого источника необходимо минимизировать.

Согласно [24], наиболее эффективное функционирование системы выпуска сточных хозяйственно-бытовых вод с населенных пунктов в Черное море предполагает ее организацию таким образом, чтобы оголовок выпуска находился под основным пикноклином, на глубине ~75 – 86 м. Поэтому, одна



Р и с . 9 . Соотношение полов в мидийных поселениях на участках акватории Балаклавской бухты с различной степенью загрязнения вод: Батопорт (а), Штольня (б), м.Балаклавский (в), Серебряный пляж (г) [22].

из задач по оздоровлению экологической ситуации в бухте должна решаться на основе обозначенного выше критерия.

В настоящее время имеется ряд проектов, предполагающих нейтрализацию негативного воздействия выпуска. Первый – строительство очистных сооружений с последующим сбросом вод в Черную речку. Второй вариант – перекачка неочищенных сбросов на канализационные очистные сооружения (КОС) «Южные». Третий – очистные сооружения с использованием очищенной воды для технических нужд со сбросом излишков и аварийных сбросов на КОС «Южные». Четвертый вариант – строительство в Балаклаве собственного очистного сооружения с глубоководным сбросом механически и биологически очищенных вод в Черное море. [25].

Наиболее оптимальными, на наш взгляд, представляются третий и четвертый варианты.

Однако даже если какой-либо проект и будет реализован то, во-первых, произойдет это не скоро, во-вторых, остаются другие, хотя и менее мощные источники загрязнения. Поэтому мы предлагаем вариант дополнительной санации вод Балаклавской бухты при помощи природных биологических систем. Для этого в зонах экологического риска и локального загрязнения водной среды необходимо разместить естественные биологические фильтры.

Основным компонентом биофильтра, по нашему мнению, должны стать моллюски-фильтраторы – мидии. Кроме мидий в биофильтр целесообразно включить такие компоненты, как сообщество нефтеокисляющих бактерий (*Pseudomonas*) и макрофитов [26]. Наиболее эффективно использовать установки для культивирования морских гидробионтов, которые размещаются вокруг источника загрязнения или водоохраной зоны. Такой подход позволит изымать избыточную часть биомассы гидробионтов, чтобы не допустить вторичного загрязнения.

Искусственные поселения мидий необходимо разместить на следующих участках: кутовая часть бухты, в месте впадения р. Балаклавка; выходы коллекторов сточной и ливневой канализации; якорные стоянки судов; стенки стационарных и плавучих причалов. Кроме того, установка природных биофильтров целесообразна в зонах массового отдыха – вокруг пляжей «Мраморный» и «Городской».

Безусловно, задача возможного размещения естественных биологических фильтров должна быть предварительно тщательно проработанной на теоретическом и экспериментальном уровнях.

Заключение. Анализ литературных сведений, эмпирических и теоретических океанологических исследований, проведенных в Балаклавской бухте в 90-е гг. прошлого столетия после ликвидации военной базы, а также в течение последнего десятилетия, позволяют сформулировать их основной результат.

За время существования военно-морской базы Балаклавская бухта потеряла свое рыбохозяйственное и, в значительной мере, рекреационное значение. В 90-е гг. прошлого столетия после вывода военного флота воды бухты повсеместно характеризовались наличием широкого спектра загрязнителей.

В начале нынешнего столетия, спустя десятилетие после демилитаризации, морская среда Балаклавской бухты определялась как грязная. В донных отложениях зафиксировано высокое содержание тяжелых металлов и

мышьяка. Отмечено снижение видового состава гидробионтов, бедность видового состава донных сообществ и низкие показатели биомассы, численности, видового разнообразия микробентоса. В целом же к началу XXI ст. экологическая ситуация в бухте улучшилась.

Результаты мониторинговых гидрохимических и гидрооптических исследований, проведенных в 2000 – 2010 гг., позволили получить представление о современном уровне загрязнения вод бухты, выявить закономерности распространения, особенности вертикальной структуры полей загрязняющих веществ, определить факторы и закономерности их сезонной изменчивости, на качественном уровне оценить межгодовые тенденции степени загрязнения ее вод.

В частности показано, что наиболее загрязнена мелководная часть Балаклавской бухты, принимающая сточные и ливневые воды. Интенсивная антропогенная нагрузка и слабый водообмен способствуют аккумуляции загрязняющих веществ на этом участке. Здесь загрязнена вся толща вод от поверхности до дна. Воды отличаются высокой мутностью. Обнаружено избыточное содержание общего взвешенного вещества, растворенного органического вещества и нефтепродуктов, заметное превышение предельно-допустимых концентраций отдельных гидрохимических показателей. Современный уровень трофности в водах мелководной части бухты классифицируется как высокий.

Второй по степени загрязнения участок акватории бухты расположен в её мористой юго-восточной области. Поступающие сюда из канализационного коллектора г.Балаклава загрязняющие вещества аккумулированы в тонком верхнем слое, где их концентрация на порядок превышает природный фон. Показано, что хозяйственно-бытовые стоки г.Балаклава не попадают под основной черноморский пикноклин. Они концентрируются в верхнем слое над скачком плотности и распространяются по всей акватории бухты. Наиболее интенсивно канализационными стоками г.Балаклава бухта загрязняется при умеренных и сильных ветрах южной четверти, когда у ее восточного берега формируется течение северного направления. Существующая система выпуска хозяйственно-бытовых вод г.Балаклава малоэффективна и требует модернизации.

По всему периметру мелководной части бухты у причальных линий, в местах якорных стоянок наблюдаются локальные максимумы содержания нефтепродуктов, а в донных отложениях – повышенная концентрация тяжелых металлов и мышьяка. Возможно, грунт на этих участках превратился во вторичный источник загрязнения.

Наиболее чистые воды с показателями, близкими к природным, свойственны мористой юго-западной области бухты, расположенной к югу от штольни.

Распространение загрязняющих веществ от прибрежных источников определяется вихревой структурой локальной системы течений и развитой вертикальной циркуляцией вод. Эти свойства обуславливают быстрое проникновение загрязнителей и неравномерное поле их концентрации. В маловетреную погоду и при зональных ветрах после одновременного импульсного выпуска трех основных источников (выпуск сточных вод г.Балаклава; ливневый сток; выпуск сточных вод завода «Металлист») загрязняющая примесь в те-

чение суток распространяется на преобладающую часть акватории бухты и смежные участки открытого моря, охватывая всю водную толщу. Процессы распространения загрязняющей примеси интенсифицируются при умеренных и сильных меридиональных ветрах, когда в течение полусуток загрязнению подвергается вся внутренняя область акватории Балаклавской бухты.

Результат исследования отклика мидии (*Mytilus galloprovincialis* Lam.) на степень загрязнения водной среды позволяет использовать этот моллюск в роли индикатора, для отслеживания временных тенденций изменения качества вод. Экологический мониторинг Балаклавской бухты по показателям состояния мидии представляется эффективным и перспективным.

В настоящее время тенденцию изменения степени загрязнения вод Балаклавской бухты можно оценить лишь качественно. В последнее десятилетие здесь наблюдается стабилизация гидрохимического режима. Вместе с тем, в связи с развитием Балаклавы, как курортной зоны, влияние антропогенного фактора усиливается. Современный уровень концентрации гидрохимических показателей в бухте намного превышает значения, характерные для открытых областей Черного моря.

Среди неотложных мер по оздоровлению экологической ситуации в бухте в первую очередь необходимо решить проблему очистки и сброса хозяйственно-бытовых вод г.Балаклава. При этом оголовок системы сброса необходимо заглубить под основной пикноклин.

Рассмотрен вариант дополнительной санации вод Балаклавской бухты, предусматривающий размещение в зонах экологического риска и локального загрязнения водной среды естественных биологических фильтров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенкович В.П. Берега Черного и Азовского морей.— М.: Географгиз, 1958.— 376 с.
2. Попов М.А. Геоморфологический очерк залива Мегало-Яло и Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.— вып.14.— С.209-214.
3. <http://snorque.livejournal.com/86597.html>
4. Ковригина Н.П., Попов М.А., Лисицкая Е.В., Сеничева М.И., Субботин А.А. Оценка антропогенного воздействия и сгонно-нагонных явлений на экологическое состояние вод Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003.— вып.8.— С.105-114.
5. Ковригина Н.П., Попов М.А., Лисицкая Е.В., Куфтаркова Е.А., Губанов В.И. Комплексный мониторинг вод Балаклавской бухты (Черное море) в период 2000 – 2007 гг. // Морской экологический журнал.— 2010.— 9, № 4.— С.62-75.
6. Vollenveider R., 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, turbidity and generalized water quality index.— 1998.— № 9.— Environmetrics.— P.329 -357.
7. <http://www.ecodevice.narod.ru/turbidimeter/turbidimeter.htm>
8. Кубряков А.И., Попов М.А. Моделирование циркуляции и распространения загрязняющей примеси в Балаклавской бухте // Морской гидрофизический журнал.— 2005.— № 3.— С.49-61.

9. *Фомин В.В., Репетин Л.Н.* Численное моделирование ветровых течений и распространения примеси в Балаклавской бухте // Морской гидрофизический журнал.– 2005.– № 4.– С.43-58.
10. *Ломакин П.Д., Попов М.А.* Циркуляция вод в Балаклавской бухте на основе экспериментальных и теоретических исследований // Вестн. Гидрометцентра Черного и Азовского морей.– 2010.– вып.1(11).– С.120-127.
11. *Ревков Н.К., Просвилов Ю.В., Логачев В.С.* Распределение и состояние бентоса под влиянием сброса шламовых вод (район Балаклавы, глубина 25 – 85 м) / Часть 2. Деп. ВИНТИ.– 1992.– № 585.– 17 с.
12. *Миронов О.Г., Кирюхина Л.Н., Алемов С.В.* Комплексные экологические исследования Балаклавской бухты // Экология моря.– 1999.– вып.49.– С.16-20.
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. *Мезенцева И.В., Чайкина А.В., Клименко Н.П.* Современный уровень загрязнения вод акватории Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003.– вып.8.– С.115-118.
15. *Ревков Н.К.* Таксоценоз моллюсков биотопа рыхлых грунтов Балаклавской бухты (Крым, Черное море) // Экология моря.– 2006.– вып.72.– С.38-46.
16. *Овсяный Е.И., Котельянец Е.А., Орехова Н.А.* Мышьяк и тяжелые металлы в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) // Морской гидрофизический журнал.– 2009.– № 4.– С.67-80.
17. *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.
18. *Ломакин П.Д., Попов М.А., Куфтаркова Е.А., Ковригина Н.П.* Проявление апвеллинга в полях гидрофизических и гидрохимических элементов на акватории Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.23.– С.180-192.
19. *Свищев С.В., Кондратьев С.И., Коновалов С.К.* Закономерности сезонных изменений содержания и распределения растворенного кислорода в водах Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал.– 2011.– № 4.– С.64-78.
20. *Ломакин П.Д., Попов М.А., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Поле мутности и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты на основе гидрооптических методов наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– вып.26, т.1.– С.249-256.
21. *Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Оценка концентрации нефтепродуктов в прибрежных водах Крыма на основе данных оптических измерений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– вып.14.– С.245-258.
22. *Мачкевский В.К., Попов М.А., Ковригина Н.П., Лозовский В.Л., Козинцев А.Ф.* Изменчивость параметров популяции мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. и ее эндосимбионтов в районе Балаклавской бухты // Экологическая безопасность

- прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– вып.25, т.1.– С.417-428.
23. Малиновская Л.В., Зинченко Т.Д. *Mytilaster lineatus* (Gmelin): Многолетняя динамика, распределение инвазионного моллюска в северном Каспии // Российский журнал биологических инвазий.– 2009.– № 1.– С.7-17.
 24. *Моделирование* процессов самоочищения вод шельфовой зоны моря / Под ред. В.И.Заца, Г.А.Гольдберга.– Л.: Гидрометеиздат, 1991.– 232 с.
 25. Новый Севастополь. Независимая on-line газета. http://new-sebastopol.com/accent/Karp_Bulatov
 26. Миронов О.Г. К вопросу о самоочищении морской воды от нефтепродуктов // Гидробиологический журнал.– 1969.– № 4.– С.89-93.

Матеріал надійшов у редакцію 20.05.2013 г.

АНОТАЦІЯ На основі аналізу літературних джерел, масиву емпіричних даних, зібраних в Інституті біології південних морів НАН України та Морському гідрофізичному інституті НАН України у рамках моніторингових океанографічних досліджень 2000-2010 років, а також модельних експериментів виконана оцінка ступеню забруднення вод на різних ділянках Балаклавської бухти. Розглянуто екологічні наслідки довготермінового базування у бухті військового флоту СРСР. Виявлено закономірності розповсюдження забруднюючих речовин з реальних джерел та на якісному рівні оцінено сучасні міжрічні тенденції показників забруднення вод. Протестований та запропонований метод контролю якості вод Балаклавської бухти. Рекомендовані заходи щодо покращення екологічного стану її водної екосистеми.

ABSTRACT Based on the analysis of literary information, empirical data array gathered at the Institute of biology of the southern seas of the Ukraine NAS and the Marine hydrophysical Institute of the Ukraine NAS in carrying out monitoring of oceanographic research in 2000-2010, as well as model experiments the degree of water pollution in various sections of the Balaklava Bay is evaluated. Environmental effects-based USSR military fleet is considered. Patterns of distribution of contaminants from real sources are identified. Interannual trend indicators of pollution are evaluated. Measures to improve the environmental situation are recommended