



УДК [551.46.09:504.42.054:65.6]574.5

С. И. Рубцова, к.б.н., с.н.с., **Е. А. Тихонова**, м.н.с., **Н. В. Бурдиян**, к.б.н., м.н.с.,
Ю. В. Дорошенко, к.б.н., м.н.с.

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

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЕВАСТОПОЛЬСКИХ БУХТ ЧЁРНОГО МОРЯ ПО ОСНОВНЫМ ХИМИЧЕСКИМ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

По материалам санитарно-биологической съёмки 2009 г. рассмотрено экологическое состояние севастопольских бухт Чёрного моря, сделаны предложения по улучшению экологического состояния акваторий и составлена классификация этих бухт по степени экологического неблагополучия. Проанализированы критерии оценки экологического состояния морских береговых зон по основным химическим и микробиологическим показателям. Один из путей улучшения экологического состояния акваторий основан на создании искусственных гидробиологических систем для очистки загрязнённых морских вод и оздоровления прибрежных акваторий.

Ключевые слова: нефтяные углеводороды, хлороформ-экстрагируемые вещества, Eh, pH, натуральная влажность, бактерии, дрожжи, прибрежная зона, донные осадки, Чёрное море.

Экологические исследования стали неотъемлемой и обязательной частью изучения территории Украины и прилегающих морских акваторий, однако до настоящего времени нет единого методического подхода к определению критериев оценки экологического состояния прибрежной зоны.

Экологическая обстановка может классифицироваться по возрастанию степени экологического неблагополучия следующим образом [6]: относительно удовлетворительная; напряжённая; критическая; кризисная (или зона чрезвычайной экологической ситуации); катастрофическая (или зона экологического бедствия).

Выявление зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия для морских акваторий проводится по основным химическим и биологическим показателям на основе анализа и обобщения результатов многолетних наблюдений.

Для совокупной оценки опасных уровней химического загрязнения вод в случае выявления нескольких загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК), применяется формализованный сум-

марный показатель химического загрязнения (ПХЗ-10 – из 10 преобладающих по превышению ПДК загрязняющих веществ). Этот критерий применяется только для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. К дополнительным показателям по химическому загрязнению отнесены БПК-5, растворённый кислород, общее количество нефтяных углеводородов и хлороформ-экстрагируемых веществ [7, 11].

Для оценки чрезвычайной экологической ситуации по биологическим показателям используются структурные и функциональные характеристики бактерио-, фито- и зоопланктона, бентоса и иктофауны, а также отдельных таксонов и видов гидробионтов. К дополнительным биологическим показателям оценки состояния морских экосистем отнесен показатель «морфологические изменения гидробионтов».

Группа критериев оценки экологического состояния донных осадков включает геохимические и биологические критерии. Это химические элементы (Cd, Hg, Pb, Zn, Cu, As, P_{общий}, N_{общий}), цианиды, фенолы, нефтепродукты, ароматические углеводороды) [10].

Для оценки экологического состояния собственно экосистем можно применять следующий комплекс критериев: уменьшение биоразнообразия (индекс Симпсона, в % от нормы), плотность популяции видов-индикаторов, площадь коренных ассоциаций, изменение видового состава, коэффициент накопления в гидробионтах поллютантов, возрастной спектр генопопуляций доминантов, возобновление, соотношение ассоциаций с разной степенью нарушенности экосистем, структурно-функциональные характеристики состояния и трофическая структура экосистем. Рекомендуется использовать любые иные показатели, дающие дополнительные сведения о характере, причинах и степени неблагоприятной ситуации.

Таким образом, критериями оценки экологического состояния морских акваторий являются:

- химические вещества при стабильном сохранении химического загрязнения в течение трёх лет;
- формализованный суммарный показатель химического загрязнения вод для 10 максимально превышающих ПДК загрязняющих веществ;
- кислород растворённый;
- биомасса планктона и макрозообентоса;
- число видов в планктонных сообществах (видовое разнообразие);
- запасы ихтиофауны и промысловых беспозвоночных;
- состояние сообществ зообентоса;
- численность индикаторных форм микроорганизмов;
- доля гидробионтов-вселенцев;
- уровень первичной продукции;
- состояние макрофитов;
- морфологические изменения гидробионтов (размеры и масса тела, появление уродливых форм и т.п.).

Для анализа экологического состояния морской береговой зоны Чёрного моря нами предложены и применены на практике следующие критерии:

- Оценка бактериологического состояния морской воды и донных отложений прибрежных зон с различной степенью антропогенной и рекреационной нагрузки. В данном случае анализ включает определение общего количества гетеротрофных бактерий, как показателя фоновой характеристики морской среды; микробного числа – показателя загрязнения хозяйственно-фекальными сточными водами; общего количества бактерий, разрушающих

основные классы органических веществ (белков, углеводов, липидов, углеводородов, включая нефтяные); изучение анаэробной группы бактерий (тионовых, денитрифицирующих и сульфатредуцирующих) как показателей преобразования антропогенного загрязнения в условиях дефицита кислорода. При изучении гетеротрофных бактерий и их биохимических особенностей фактически охватывается весь процесс бактериальной деструкции органического вещества как основной фактор самоочищения в море. Такие комплексные исследования позволяют оценить качество морской воды, прогнозировать процессы самоочищения и, в конечном итоге, дают возможность управлять качеством морской среды в акваториях, подверженных рекреационной нагрузке.

- Определение численности и биомассы экологических групп макрозообентоса. Исследование сообществ макрозообентоса является неотъемлемой составной частью регулярного экологического мониторинга и необходимо для определения роли биоты в процессах самоочищения.

- Оценка физико-химического состояния прибрежных наносов и донных осадков. Особое внимание уделяется нефтяному загрязнению (НУ) и общему количеству хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ).

- Выявление в морском микробном сообществе дрожжей. Нами установлено, что некоторые виды дрожжей перифитона способны не только сохранять жизнеспособность, но и активно накапливать биомассу даже при высоких концентрациях нефтепродуктов, участвуя, таким образом, в трансформации нефтяных углеводородов аллохтонного происхождения [2]. Это даёт основание рекомендовать при экологическом мониторинге вести учёт в сообществе микроорганизмов не только бактерий, но и морских дрожжей.

- Изучение потоков нефтяных углеводородов, моделирование процессов самоочищения прибрежной зоны от органических загрязнителей, проведение оценки экологической чувствительности сева­стопольского побережья к нефтяному загрязнению, изучение роли морских организмов в утилизации органических веществ.

Предложенные нами критерии для анализа экологического состояния морской береговой зоны Чёрного моря направлены на оценку состояния отдельных компонентов прибрежных экосистем, отдельные значения количественных характеристик

которых отвечают удовлетворительному, напряжённому, кризисному и катастрофическому экологическому состоянию морской береговой зоны. Эти экологические состояния отвечают соответственно следующим состояниям экосистем: оптимальное, преобладание давления в сторону стресса, и стрессовое.

Целью настоящей работы была оценка экологического состояния Севастопольских бухт по основным химическим и микробиологическим показателям на основе санитарно-биологической съёмки 2009 г. и многолетних данных отдела морской санитарной гидробиологии ИнБЮМ НАНУ. К химическим показателям мы отнесли: окислительно-восстановительный потенциал (Eh), pH, натуральная влажность, гранулометрический состав, общее количество хлороформ-экстрагируемых веществ и нефтяных углеводородов; микробиологические показатели: численность сульфатредуцирую-

щих, тионовых, денитрифицирующих, нефтеокисляющих, гетеротрофных бактерий и дрожжей.

Материал и методы. Материалом для работы послужили пробы донных осадков, отобранные во время санитарно-биологической съёмки сева-стопольских бухт летом 2009 г. (рис. 1). При выборе станций для отбора проб, прежде всего, руководствовались тем, чтобы они различались по удалённости от открытой части моря, степени антропогенной и рекреационной нагрузки, интенсивности загрязнения, составом донных отложений и т. д. Так, бухты Севастопольская и Камышовая являются портовыми и интенсивно используются в промышленных целях, бухты Круглая и Казачья эксплуатируются, в основном, в рекреационных целях и считаются относительно чистыми районами, в первую очередь, по содержанию НУ в донных осадках бухт.

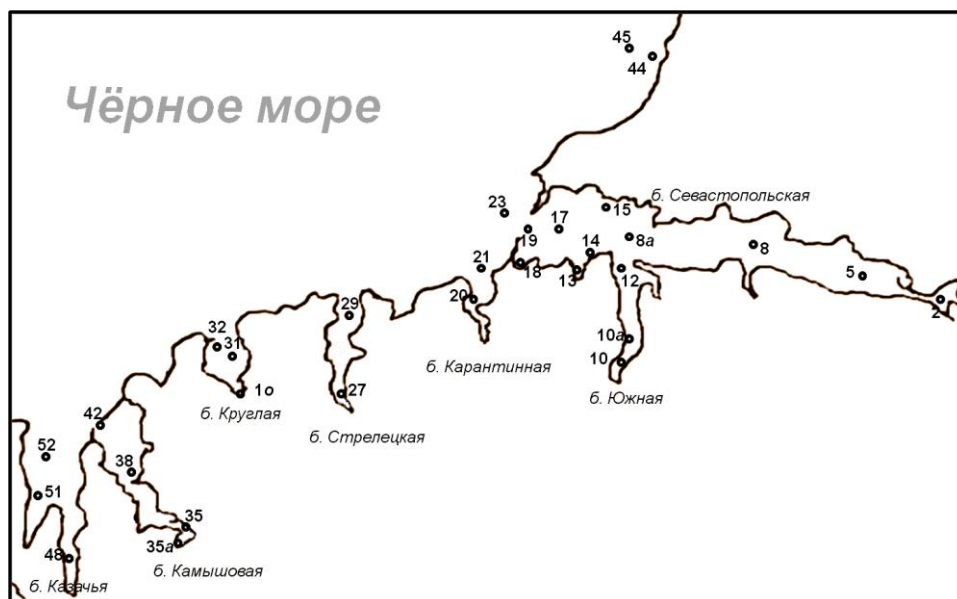


Рис. 1 Схема расположения станций отбора проб донных осадков в сева-стопольских бухтах летом 2009 г.

Fig. 1 The scheme of sampling stations of sea bottom sediments in the Sevastopol bays in summer 2009

Отбор проб донных осадков (рис. 1, 2, 5) проводили с глубин от 7 до 17 м в бухтах Севастопольская (30 станций), Камышовая (9), Круглая (4) и Казачья (6) (нумерация сохранена в соответствии с предыдущими годами). Отбор осуществляли дночерпателем Петерсена с площадью захвата 0.038 м² с борта мотобота, в Б. Круглая на глубине 1 – 1.5 м ручным пробоотборником. Пробы стерильно помещали в склянки с притёртыми пробками. В свежесобраных пробах донных отложений определяли окислительно-восстановительный потенциал (Eh), pH, натуральную влажность и гранулометрический состав [4]. В подготовленных соответствующим

образом воздушно-сухих пробах находили общее количество хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) весовым методом и нефтяных углеводородов (НУ) методом инфракрасной спектроскопии [11]. Все полученные результаты пересчитаны на 100 г воздушно-сухого донного осадка (возд.-сух. д. о.).

Численность сульфатредуцирующих, тионовых, денитрифицирующих, нефтеокисляющих, гетеротрофных бактерий и дрожжей определяли по [1, 2, 14]. Накопительные культуры дрожжей получали на солодово-дрожжевом бульоне (СДБ) [3, 12]. Объём пробы, который вносили в СДБ, составлял 1 мл соответствующего разведения в трёх повторностях. Способность и интенсивность роста дрожжевых культур на нефти и нефтепродуктах определяли посевом выделенных культур на среде Диановой–

Ворошиловой с последующим добавлением источников углерода. В качестве источника нефтяных углеводородов использовали дизельное топливо, флотский мазут и сырую нефть. Концентрация источников углерода в среде составляет 0,5 %. Кроме того, использовали также пептон, крахмал, жир и фенол. Рост оценивался визуально по характерным показателям роста микроорганизмов. Помимо сред с испытуемыми источниками углерода засевали две пробирки контрольными средами – одна без какого-либо источника углерода (отрицательный контроль), другая с глюкозой (положительный контроль), согласно [3]. Все полученные данные подвергали статистической обработке по методу МакКреди и с использованием пакетов стандартных программ "Microsoft Exel 7.0" и "Statistica" для персонального компьютера.

Результаты и обсуждение. Бухта Севастопольская. Относится к акваториям активного хозяйственного использования; общая протяжённость причальных стенок в ней составляет 11 км. Гидродинамической особенностью бухты является наличие антициклонической динамической структуры с конвергенцией

в центре и подъёмом изоповерхностей на периферии. Это приводит к существованию квазистационарной области в центре бухты, которая оказывает влияние на динамику и распределение современных донных осадков [10]. Пробы донных осадков, отобранных в бухте Севастопольской, представляли собой чёрные или тёмно-серые илы, чаще с запахом мазута и сероводорода. В донных осадках на станциях 13, 18 (рис. 2А) преобладал илистый песок, иногда с примесью ракуши. Известно, что физико-химические свойства (рН, Eh, натуральная влажность) и морфоструктура донных осадков (гранулометрический состав) определяют их способность к аккумуляции и преобразованию поступающих загрязнений [4]. Кроме того, большая площадь донной поверхности бухты представлена тонкозернистыми чёрными илами с пониженными значениями рН и ярко выраженными восстановительными условиями, что свойственно загрязнённой среде.

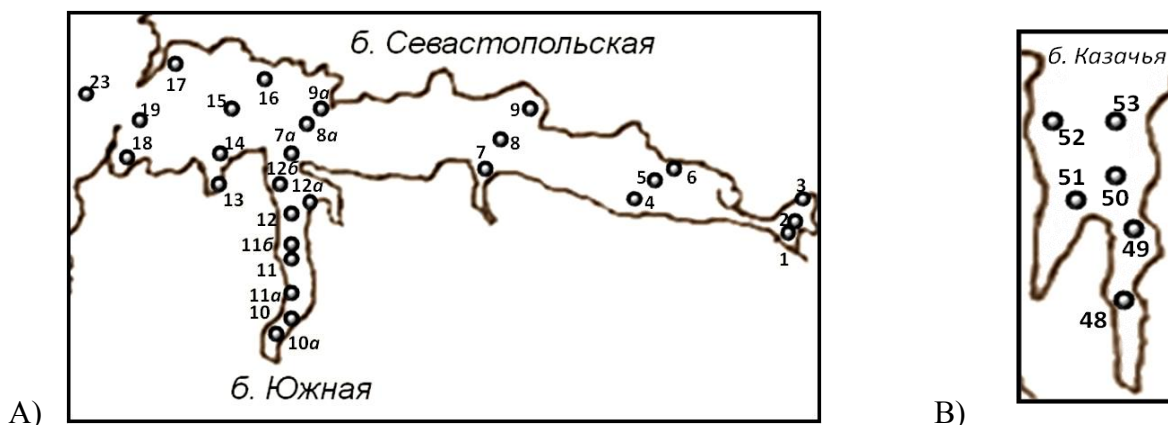


Рис. 2 Схема расположения станций отбора проб в Севастопольской (А) и Казачьей (В) бухтах
 Fig. 2 The scheme of sampling stations of sea bottom sediments of Sevastopol bay (A) and Kazachya bay (B)

По данным съёмки 2009 г., донные отложения на исследуемых станциях были представлены III (в устьевой части – ст. 1, 4, 5; в вершине – ст. 14, 16, 17, 18, 19, 20 и 23), IV (ст. 2, 3, 6, 13, 15) и самым высоким V (центральная часть бухты – ст. 7 – 12б) уровнями загрязнения. Исключение составляет ст. 21 с мини

мальными значениями ХЭВ, которое составило 90 мг/100 г. Так, уровни содержания ХЭВ: 1-й – менее 0.05, 2-й – 0.05 – 0.09, 3-й – 0.1 – 0.49, 4-й – 0.50 – 0.99, 5-й – более 1.0 мг/100 г [9]. Данные уровни нефтяного загрязнения определены по содержанию в донных осадках ХЭВ (рис. 3).

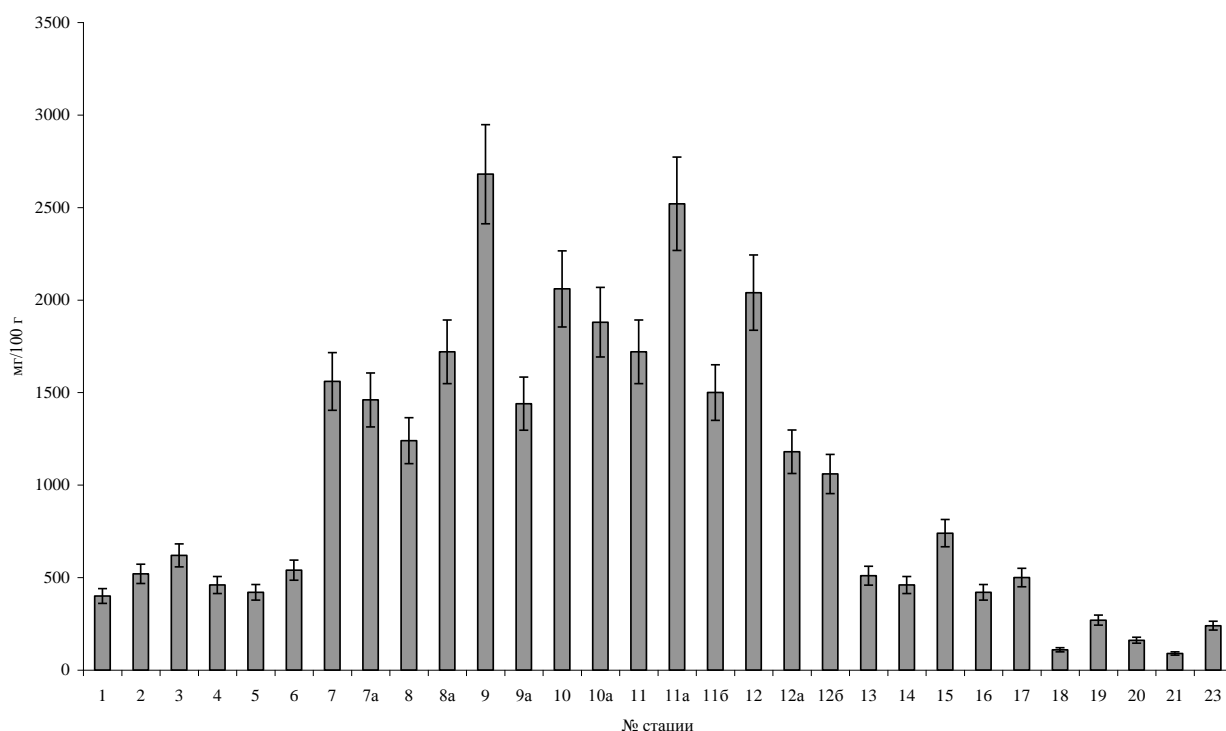


Рис. 3 Содержание хлороформ-экстрагируемых веществ (мг/100 г) в донных осадках исследуемой акватории Севастопольской бухты

Fig. 3 The concentration of chloroform-extractable substances in the sea bottom sediments of the Sevastopol bay

Донные осадки III уровня загрязнения имели разный гранулометрический состав (пески с примесью ила, пустых раковин моллюсков и их обломков), тёмно-серый цвет, присутствовал запах сероводорода и нефтепродуктов. Донные осадки IV уровня загрязнения были подобны осадкам предыдущего уровня, но с более сильным запахом нефтепродуктов, иногда на их поверхности встречались нефтяные пятна с маслянистым блеском. Илы V уровня загрязнения отличались интенсивным чёрным цветом, резким запахом сероводорода и нефтепродуктов, встречались остатки органики в виде перегнивших водорослей.

Морские грунты с низким уровнем нефтяного загрязнения характеризовались и более низкими показателями влажности. Исключение составили ст. 1 (при низком уровне загрязнения (III) отмечен высокий показатель влажности (64.8 %)) и ст. 13 (при высоком уровне загрязнения (IV), самый низкий из зарегистрированных в б. Севастопольская показатель влажности (18.1 %)). Скорее всего, это

связано с гранулометрическим составом донных осадков на этих станциях: на ст. в большем количестве присутствовали тонкие частицы, а на ст. 13 – мелкий гравий и галька. Данное предположение подтверждают и значения Eh. С возрастанием в донных осадках количества ила при повышенных уровнях загрязнения (IV-V) натуральная влажность увеличилась до 69.3 %.

Донные осадки на большинстве исследуемых станциях обладали восстановительными условиями среды (отрицательный показатель Eh) и пониженным pH среды. В то же время пески (ст. 21, 23) имели положительный Eh. При повышенных уровнях загрязнения с увеличением притока в донные осадки мало-разложившегося органического вещества (в первую очередь, нефтепродуктов) растёт восстановительный потенциал. Донные осадки V уровня загрязнения имеют самый высокий отрицательный окислительно-восстановительный потенциал (от -114 до -174 мВ). Данный уровень и показатели Eh отмечены в бухтах

Южная и Севастопольская: Eh колебался от +100 в песках до -164 в илах.

Показатель рН по уровням загрязнения меняется в меньшей степени, чем Eh. В донных осадках III уровня рН колебался от 7.44 до 7.57, IV – V уровней – от 7.56 до 7.9 (исключение составили ст. 2, 3, 10а), т. е. рН в загрязнённых донных отложениях был несколько выше (реакция среды более щелочная). Это, возможно, связано с попаданием в морской грунт, наряду с нефтью и нефтепродуктами, хозяйственно-бытовых стоков, которые, в свою очередь, способствуют увеличению рН.

Данные показатели рН, Eh, объединённые формулой Кларка, трансформировались в один показатель $гН_2$ ($гН_2 = Eh / 30 + 2рН$) [5], являющийся отрицательным логарифмом количества газообразного водорода, который колеблется от 10 – 15 в донных осадках с восстановительными условиями среды до 18 – с окислительными. Корреляционный анализ подтвердил, что $гН_2$ находился в противофазе с такими химическими показателями, как ХЭВ и НУ, причём между $гН_2$ и ХЭВ связь более устойчивая ($r = -0.5$, $n = 30$, $P < 0.05$).

Количество ХЭВ изменяется от 90 (ст. 21) до 2680 мг/100 г возд.-сух. д. о. (ст. 9) (рис. 2). Минимальный отмеченный показатель ХЭВ на ст. 21 соответствовал II уровню загрязнения. III уровню соответствовали показатели в устьевой части бухты с незначительным колебанием от 400 до 460, а в вершине – с более существенным от 110 до 500. Для IV уровня верхняя граница содержания ХЭВ в донных осадках составляет 1000 мг/100 г, а отмеченные нами показатели приближены к нижней границе уровня (к 500 мг/100 г) – от 510 до 620 (исключение ст. 15, в донных отложениях которой зафиксировано 740 мг/100 г ХЭВ). V уровень (отмечен только в б. Южная) характеризуется показателями ХЭВ от 1060 до 2680 мг/100 г возд.-сух. д. о. При увеличении уровня загрязнения увеличивается и общее количество ХЭВ, причём при V уровне их концентрация в несколько раз выше. Кроме того, высокие показате-

тели отмечены, в основном, в жидких и полужидких илах с восстановительными условиями среды.

Загрязнённость донных осадков подтверждалась и полученными данными по содержанию НУ в них (рис. 3). По исследованным станциям НУ распределялись в том же порядке, что и ХЭВ. Их доля от общего количества ХЭВ в донных осадках составляет в среднем для III уровня загрязнения – 29.6 %, IV – 30.8 %, V – 41.1 %. Наименьшие количества НУ содержались в донных осадках устья бухты (ст. 2) и на ст. 4 и 5 (от 114 до 80 мг/100 г возд.-сух. д. о. соответственно), которые относились к III уровню загрязнения. Наиболее загрязнена нефтепродуктами центральная часть бухты (ст. 7, 8 а, 9, 9 а), их максимальные концентрации достигали здесь 1336.2 мг/100 г возд.-сух. д. о. (ст. 9 а).

Следует отметить, что санитарно-экологические нормативы для оценки степени загрязнения донных осадков нефтяными углеводородами до настоящего времени отсутствуют. В Украине ПДК нефти и продуктов её переработки в донных осадках не установлены и, если ориентироваться на нормированные показатели для почв (ПДК НУ = 0.2 мг·кг⁻¹), то концентрации поллютантов на большинстве станций значительно превышают допустимые значения (рис. 4).

В донных осадках вершинной и центральной части бухты численность гетеротрофных бактерий колебалась от $9.5 \cdot 10^3$ до $9.5 \cdot 10^4$, нефтеокисляющих – от 95 до $4.5 \cdot 10^3$ кл. г⁻¹ (табл. 1). На станции перед входом в бухту численность анализируемых бактерий сопоставима с таковой в бухте. Количество бактерий на выходе из б. Южная находится в пределах одного порядка с показателями численности, полученными в её вершинной части. Наибольшая численность нефтеокисляющих бактерий выявлена в донных осадках наиболее загрязнённых станций – в районе вершин бухт Артиллерийская и Южная, входящих в акваторию бухты Севастопольская (рис. 2А).

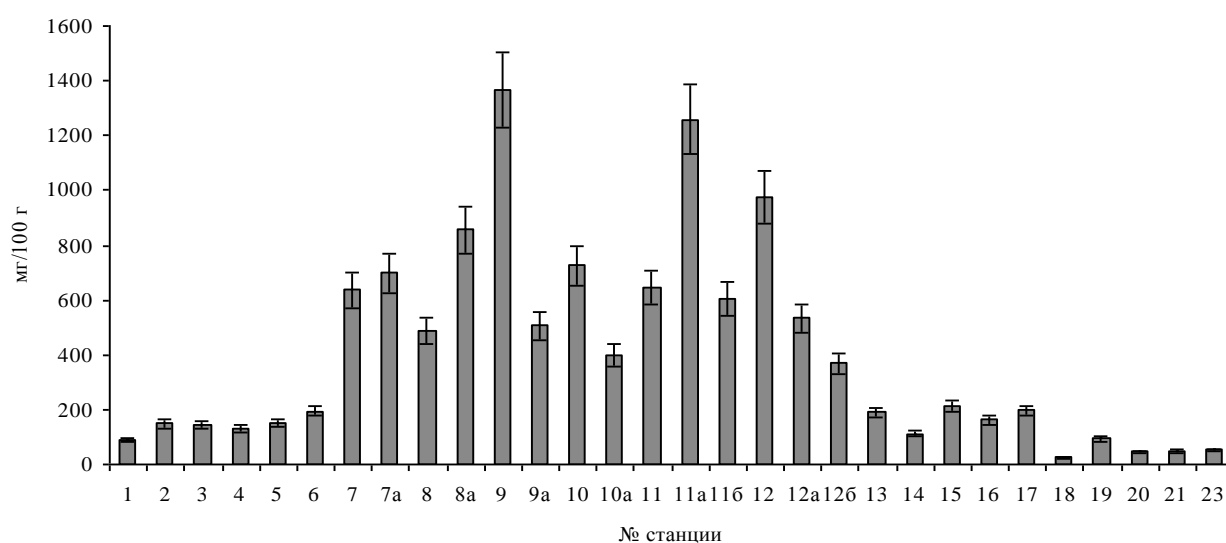


Рис. 4 Содержание нефтяных углеводородов (мг/100 г) в донных осадках исследуемой акватории Севастопольской бухты

Fig. 4 The concentration of oil hydrocarbons in the bottom sediments of the Sevastopol bay

Табл. 1 Микробиологические показатели донных осадков бухт Севастополя в 2009 г.

Table 1 Microbiological indexes of sea bottom sediments of the Sevastopol bays in 2009

Станции	СРБ, кл. г ⁻¹	ТБ, кл. г ⁻¹	ДНБ, кл. г ⁻¹	НБ, кл. г ⁻¹	ГБ, кл. г ⁻¹
б. Севастопольская					
2	1.3	9.5*10	2.5*10	4.5*10 ²	9.5*10 ⁴
5	6.0	2.5*10 ²	2.5*10	4.5*10 ³	9.5*10 ⁴
8	2.5	9.5*10 ²	2.5*10	4.5*10 ²	4.5*10 ⁴
13	2.5*10 ³	9.5*10 ⁵	1.5*10 ⁴	2.5*10 ³	2.5*10 ⁵
14	7.5*10	2.5*10 ²	1.5*10 ²	2.5*10 ²	4.5*10 ⁴
15	1.5*10 ²	2.5*10	4*	9.5*10	4.5*10 ³
17	7*	9.5*10 ²	2.5*10	9.5*10	9.5*10 ³
23	6*	7.5*10 ²	2.5*10 ²	4.5*10	9.5*10 ⁴
б. Южная (акватория б. Севастопольской)					
10	6*	2.0*10 ³	4.5*10	9.5*10 ²	9.5*10 ⁴
10 a	2.5*10 ²	1.5*10 ⁴	1.5*10 ³	2.5*10 ³	9.5*10 ⁴
12	9.5*10	9.5*10 ²	9.5*10	4.5*10 ²	4.5*10 ⁴
б. Круглая					
31	6*	4.5*10 ⁴	2.5*10 ³	9.5*10 ²	1.5*10 ⁵
32	2.5*10	9.5*10 ³	2.5*10 ³	4.5*10	1.5*10 ⁵
1*(вершина)	2.0*10 ³	1.5*10 ⁵	2.5*10 ²	2.5*10 ³	9.5*10 ⁴
б. Камышовая					
35	9.5*10 ³	2.0*10 ⁴	2.5*10 ³	9.5*10 ²	9.5*10 ⁴
35 a	4.5*10	9.5*10	4.5*10 ²	2.5*10 ²	9.5*10 ³
38	6*	4.5*10 ²	9.5*10	2.5*10 ²	2.5*10 ⁴
42	2.5*10 ³	2.5*10 ³	4.5*10 ²	2.5*10 ²	2.5*10 ⁴
б. Казачья					
48	2.0*10 ²	4.5*10 ²	2.5*10 ³	4.5*10 ²	4.5*10 ⁴
51	6*	4.5*10 ²	2.5*10	4.5*10 ²	9.5*10 ⁴
52	6.0	2.5*10 ⁴	4.5*10	9.5*10	9.5*10 ⁴

Примечание: СРБ – сульфатредуцирующие бактерии, ТБ – тионовые бактерии, ДНБ – денитрифицирующие бактерии, НБ – нефтеокисляющие бактерии, ГБ – гетеротрофные бактерии, « * » – количество бактериальных клеток в 10г донных осадков

При изучении сульфатредуцирующих бактерий в донных осадках установлено, что в вершинной части бухты насчитывалось до 10 клеток на 1 г осадка (табл. 1). В центральной части и устье бухты их численность колебалась от единиц до сотен, причём максимум отмечен в районе действующего причала на северной стороне бухты. На станциях в зоне активного судоходства численность сульфатредукторов сопоставима с районом внешнего рейда. Наибольшая численность данной группы бактерий выявлена в кутовой части б. Артиллерийская (ст. 13, рис. 2А).

Численность тионовых бактерий в вершинной части бухты варьировала от десятков до сотен. В центральной части и устье бухты количественные колебания составляли от десятков до тысяч клеток на грамм осадка. На внешнем рейде число бактерий находилось в пределах одного порядка с показателями, полученными в центральной части бухты. Максимальная численность тионовых определена в вершинной части Артиллерийской бухты (ст. 13, рис. 2А).

Содержание денитрифицирующих бактерий в донных осадках вершинной части было равным и составляло 25 кл. г⁻¹ осадка. В центральной части и устье бухты оно варьировало от единиц до десятков. Донные осадки вершинной части б. Артиллерийская характеризовались высоким содержанием бактерий – до десятков тысяч. На внешнем рейде бухты численность денитрификаторов на 1 – 2 порядка выше, чем в её центральной части.

Особое место в системе севастопольских бухт занимает Южная бухта. Преобладающие в регионе Севастополя ветры северных, северо-восточных и восточных направлений запирают загрязнённые воды в бухте. В то же время под влиянием продолжительных ветров южных направлений загрязнённые воды из б. Южная сгоняются и аккумулируются в основной части Севастопольской бухты. Хроническое загрязнение приводит к накоплению загрязняющих веществ в донных осадках, а отно-

сительно высокая плотностная стратификация вод в бухте затрудняет поступление кислорода в нижележащие слои водной толщи, что приводит к развитию гипоксии [13]. Как показали наши исследования, диапазон численности сульфатредукторов в б. Южная колебался от единиц до сотен, тионовых – от сотен до десятков тысяч, денитрифицирующих – от десятков до тысяч клеток в 1 г донного осадка. В илах вершины (ст. 10 и 10 а) наблюдался значительный разброс в показателях численности, что объяснимо микронеональным распределением бактерий.

Численность анализируемых групп бактерий в вершинной части б. Южная превышала таковую в районе выхода из неё.

За период исследований мы выделили 30 штаммов морских дрожжей. Наибольшее количество выделенных культур дрожжей приходится на Севастопольскую бухту, причём из вершинной части выделили 6 штаммов, из центральной – 9 (из них 3 штамма в б. Южная) и только 3 штамма из кутовой части. Небольшое видовое разнообразие дрожжей в кутовой части компенсировалось большим количеством штаммов. Мы насчитали более 170 колоний, тогда как на всех остальных станциях – всего 45. Что касается внешнего рейда, то здесь выделить дрожжи не удалось.

Бухта Круглая. В вершинной части бухты, имеющей глубину менее 1 м, донные осадки представлены чёрными илами с большим количеством остатков перегнившей травы, с запахом сероводорода. На ст. 31 и 32, расположенных в районе устья бухты, – песок серый, мелкий с примесью ила, на выходе из бухты (ст. 33 и 34) – ракушник с примесью песка (рис. 5А).

Натуральная влажность варьирует от 28.8 до 31.9 % в донных осадках бухты, Eh – от +276 мВ в песках до -62 мВ в илах, pH 7.49 – 7.8. В вершине бухты натуральная влажность несколько выше – от 25.6 до 84.3 %; Eh отрицательный (до -134), за исключением ст. 5 (+21 мВ); pH 7.46 – 7.76 (рис. 5А).

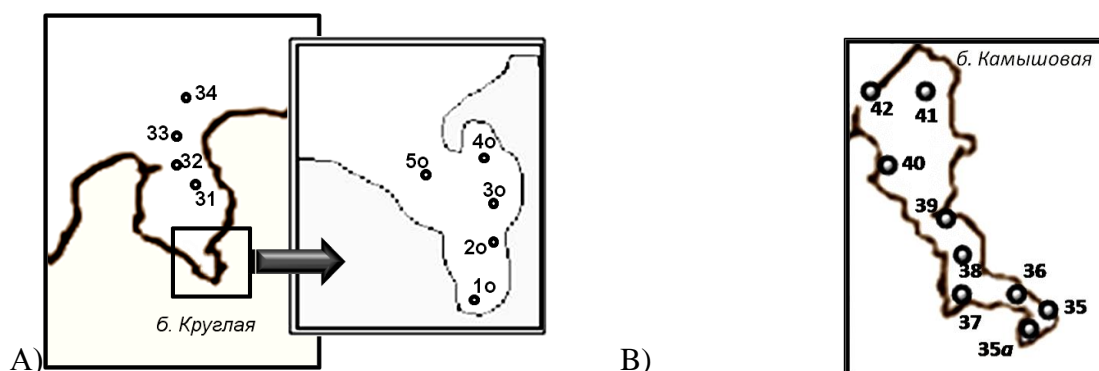


Рис. 5 Схема расположения станций отбора проб донных осадков в Круглой (А) и Камышовой бухте (В)
 Fig. 5 The scheme of sampling stations of sea bottom sediments of Kruglaya bay (A) and Kamysovaya bay (B)

Донные отложения бухты практически не загрязнены: содержание ХЭВ примерно одинаково на всех станциях – от 10.7 до 12.7 мг/100 г, количество НУ имеет следовые значения (зафиксированный максимум составил 2.8 мг/100 г на ст. 32). В вершине б. Круглая показатели НУ снижаются от 364.8 мг/100 г в илах до следовых количеств в песках. Как отмечалось ранее [15], илы вершины бухты имели черты углеводородного загрязнения, усиливающегося с годами. Нами в донных осадках в 2009 г. отмечено некоторое снижение доли НУ в ХЭВ до 26.8 %, но, тем не менее, данный уровень загрязнения является высоким.

Численность гетеротрофов в вершинной части б. Круглая на порядок ниже, чем в её центральной части, – соответственно 10^4 и 10^5 кл. г⁻¹ (табл. 1). Количество нефтеокисляющих бактерий в центральной части варьирует от десятков до сотен, в вершине бухты число углеводородокисляющих бактерий составляет $2.5 \cdot 10^3$ кл. г⁻¹. Численность сульфатредуцирующих бактерий на выходе из бухты и в её центральной части составляла соответственно $6.0 \cdot 10^{-1}$ и $2.5 \cdot 10^0$, тионовых бактерий – $4.5 \cdot 10^4$ и $9.5 \cdot 10^3$ кл. г⁻¹. На обеих станциях отмечена равная численность денитрификаторов – $2.5 \cdot 10^3$ кл. г⁻¹. Численность микроорганизмов на станции в районе вершины бухты составляла: сульфатредукторов – $2 \cdot 10^3$, тионовых – $1.5 \cdot 10^5$, денитрификаторов – 250 кл. г⁻¹. Численность сульфатредуцирующих и тионовых

бактерий в районе вершины превышает таковую на остальных станциях бухты.

Бухта Круглая не отличалась качественным и количественным разнообразием дрожжей. Удалось выделить только 2 штамма.

Бухта Камышовая. Донные осадки бухты характеризуются разнообразным гранулометрическим составом, что, соответственно, меняет физико-химические параметры грунта. Так, на ст. 35 – 38 донные отложения представлены тёмно-серыми илами или илами с примесью песка, с запахом мазута и сероводорода, на ст. 39 – ракушником с тем же запахом, на ст. 40 – 42 – песком серым с примесью ила и ракуши. При этом во всех пробах присутствовали обломочные породы и большое количество ракуши. Натуральная влажность колебалась в пределах 28.2 – 52.1 %, Eh +276... -59 мВ, рН 7.64 – 8.03 (рис. 2В).

Периодически проводимые дноуглубительные работы в бухте изменяли состояние донных осадков, отражаясь на количественных показателях. Так, нами отмечено некоторое увеличение количества ХЭВ по сравнению с 2006 г. в среднем на 39 %, за исключением ст. 39, на которой показатели ХЭВ увеличились в 4 раза. Самые максимальные значения ХЭВ и НУ отмечены на ст. 38 (455 и 158.8 мг/100 г соответственно). Процент НУ от ХЭВ колебался в пределах 18.68 (ст. 41) – 45.68 (ст. 35 а).

Численность нефтеокисляющих бактерий на всех обозначенных станциях в б. Камышовая была равнозначной и не превышала

сотни клеток в 1 г донных осадков. Число гетеротрофов находилось в пределах 10^4 кл. г⁻¹, за исключением ст. 35а, где оно составляло $9.5 \cdot 10^3$ кл. г⁻¹. Численность сульфатредуцирующих бактерий в донных осадках на исследуемых станциях различалась на несколько порядков (табл. 1). Минимум сульфатредукторов выявлен в центральной части бухты, максимум – в вершинной части. На выходе из бухты численность сульфатредуцирующих бактерий составляла $2.5 \cdot 10^3$ кл. г⁻¹. В илах вершины наблюдается разброс в показателях численности – от $9.5 \cdot 10^3$ до 45 кл. г⁻¹. Подобное явление отмечается и в вершинной части б. Южная.

Численность тионовых бактерий изменялась от 450 до 20 тыс. кл. г⁻¹, максимум выделен в вершине бухты. На выходе из бухты она составляла $2.5 \cdot 10^3$ кл. г⁻¹, что на порядок ниже, чем в её вершинной части, но выше, чем в районе кута бухты и её средней части.

Численность денитрифицирующих бактерий колебалась от 95 до $2.5 \cdot 10^3$ кл. г⁻¹. Наибольшие значения получены в вершине бухты, наименьшие – в её средней части. Равная численность определена в районе кута и на выходе из бухты (ст. 35 а и 42).

Численность анализируемых групп бактерий в вершине бухты (ст. 35) превышает показатели на остальных станциях в бухте.

Дрожжи выделены только на ст. 35.

Бухта Казачья. Для неё характерны низкий уровень химического загрязнения и высокое биологическое разнообразие [7, 8]. Дно бухты достаточно каменистое на глубинах 10 – 17 м. Ракушняки и пески (ст. 51 – 53) имели натуральную влажность 29.2 – 32.4 %, заиленные участки вершины бухты (ст. 48 – 50) – 66.5 – 76.7 %; Eh понижался с +321 в песках до -118 в илах; рН составлял 7.05 – 7.76.

На ст. 50 – 53, по сравнению с 2003 г., в последующие годы было отмечено некоторое снижение нефтепродуктов в донных осадках (на отдельных станциях до следовых количеств). Однако на ст. 48 происходит ежегодное увеличение концентрации НУ. Данная станция

находится в глубине бухты, на удалении от открытых участков моря, что также может влиять на распределение загрязняющих веществ в донных отложениях (рис. 2В).

В 2006 г. на более чем 50 % станций были обнаружены следовые или близкие к таковым количества НУ. В 2009 г. на ст. 48 – 50 в донных осадках зафиксировано в 2 раза больше нефтепродуктов, что свидетельствует об усилении антропогенного воздействия на акваторию бухты. На ст. 51–53, также как и в 2006 г., отмечены следовые количества НУ. Эти станции находятся ближе к выходу из бухты, что увеличивает возможность рассеивания нефтепродуктов в открытое море; и соответственно их меньшее количество осаждается на дно.

В загрязнённых донных осадках отмечены достаточно высокие количества ХЭВ. Если ранее [15] морские грунты бухты относили к слабо загрязнённым, то результаты 2009-го года указывают на IV уровень загрязнения на ст. 48, III – ст. 49, II – ст. 50. По сравнению с 2006 г., количество загрязняющих веществ увеличилось.

На исследуемых станциях число гетеротрофов не превышает сотни тысяч клеток в 1 г донных осадков. Численность нефтеокисляющих бактерий варьирует от десятков до сотен, причём наименьшее число получено на выходе из бухты (табл. 1).

Численность сульфатредуцирующих бактерий в вершинной части бухты составляет 200 кл. г⁻¹, а на станции, расположенной мористее и на выходе из бухты, она в несколько раз меньше. В вершинной и средней части бухты выявлено равное количество тионовых бактерий – 450 кл. г⁻¹, максимум отмечен на выходе из бухты – $2.5 \cdot 10^4$ кл. г⁻¹.

Численность денитрифицирующих микроорганизмов на ст. 51 и 52 не превышала 45 кл. г⁻¹. В вершинной части бухты отмечена их наибольшая концентрация – $2.5 \cdot 10^3$ кл. г⁻¹.

В б. Казачья только на ст. 48 было выделено 8 различных штаммов дрожжей, а

общее количество колоний, насчитанное нами, приближается к 120. Это сопоставимо только с кутовой частью Севастопольской бухты.

Данные (табл. 2) по биохимическим особенностям дрожжей указывают на возможность расщепления нефтепродуктов и других

органических веществ в природных условиях в морской среде. Всего исследовано 30 штаммов дрожжей.

Табл. 2 Биохимические особенности дрожжей в донных осадках бухт Севастополя в 2009 г.
Table 2 Biochemical peculiarity of yeasts in the bottom sediments of the Sevastopol bays in 2009

Источник углерода	Количество штаммов дрожжей	
	Абс.	%
Сырая нефть	24	80.0
Дизельное топливо	19	63.3
Флотский мазут	23	76.7
Фенол	22	73.3
Жир	25	83.3
Крахмал	28	93.3
Пептон	30	100

Нами рассчитана критическая антропогенная нагрузка нефтяного загрязнения прибойной зоны Севастопольского побережья, площадью 216 км², которая не должна превышать 700 т в год [14]. Приведенные расчёты свидетельствуют о больших потенциальных возможностях к самоочищению от нефтяных углеводородов. Однако с увеличением уровня загрязнения самоочищающая способность среды по отношению к НУ значительно снижается, что, в конечном итоге, приводит к перестройке всей структуры экосистемы и уменьшению продукционной способности нефтеокисляющих бактерий. Для более точного расчёта ассимилирующей способности морских экосистем по отношению к углеводородам нефти необходимы комплексные исследования, в том числе систематические микробиологические наблюдения в различных районах Чёрного моря [14].

Один из путей улучшения экологического состояния акваторий и стимулирования процессов естественного самоочищения основан на создании искусственных гидробиологических систем для очистки загрязнённых морских вод и оздоровления прибрежных акваторий. Севастопольская бухта рассматривается как полигон для изучения взаимодействия мор-

ских организмов с загрязнением и обработки вариантов систем гидробиологической очистки морских вод и оздоровления прибрежных акваторий. Отделом морской санитарной гидробиологии ИнБЮМ НАНУ были разработаны, сконструированы и установлены в Чёрном море в районах Новороссийска, Севастополя и Созополя (Болгария) различные варианты систем гидробиологической санации морских акваторий [15].

Выводы: 1. По степени экологического неблагополучия бухты Камышовая и Севастопольская, вершина бухты Круглая являются в основном критическими зонами, центральная часть бухты Севастопольская и бухта Южная – кризисными зонами или зонами чрезвычайной экологической ситуации, бухта Круглая, за исключением вершины бухты, относящейся к критической зоне, является напряжённой зоной, а бухта Казачья относится к относительно удовлетворительной зоне. **2.** Донные отложения Севастопольской бухты имеют III, IV (в устьевой части и в вершине бухты) и V (центральная часть бухты) уровни загрязнения, остальные бухты характеризуются I – III уровнями загрязнения. **3.** Большинство донных осадков обладали восстановительными свойствами и пониженным pH среды, в донных

осадках V уровня загрязнения наблюдался самый высокий Eh (от -114 до -174 мВ). 4. Численность гетеротрофных бактерий в вершинной и центральной частях Севастопольских бухт колебалась от $9.5 \cdot 10^3$ до $1.5 \cdot 10^5$ нефтеокисляющих – от 95 до $4.5 \cdot 10^3$ кл. г⁻¹. Наибольшая численность гетеротрофных и нефтеокисляющих бактерий выявлена в донных осадках наиболее загрязнённых станций, а наиболее

чистыми оказались донные осадки бухты Казачья. 5. Выделено 30 штаммов морских дрожжей; их наибольшее количество приходится на бухту Севастопольская. 6. Предложено использовать морские организмы в борьбе с загрязнением и для биомониторинга, а также для разработки гидробиологических систем очистки загрязнённых морских вод.

1. Бурдян Н. В. Сульфатредуцирующие, тионовые, денитрифицирующие бактерии в прибрежной зоне Чёрного моря и их роль в трансформации нефтяных углеводородов: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук: – Севастополь, 2011. – 24 с.
2. Дорошенко Ю. В. Микрофлора систем гидробиологической очистки морских вод: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. – Севастополь, 2009. – 20 с.
3. Квасников Е. И., Щелокова И. Ф. Дрожжи. Биология. Пути использования. – Киев: Наук. думка, 1991. – 326 с.
4. Кирюхина Л. Н. Влияние гранулометрического состава донных осадков на накопление аллохтонных углеводородов // Экология моря. – 1982. – Вып. 10. – С. 36 – 39.
5. Кирюхина Л. Н., Миронов О. Г. Химическая и микробиологическая характеристика донных осадков севастопольских бухт в 2003 г. // Экология моря. – 2004. – Вып. 66. – С. 53 – 58.
6. Методические основы комплексного экологического мониторинга океана. – М.: Гидрометеоиздат, 1988. – 287 с.
7. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алёмов С. В. Экологическая характеристика бухты Казачья (Чёрное море) // Экология моря. – 2002. – Вып. 61. – С. 85 – 89.
8. Михайлова Т. В., Беляева О. И. Изучение распределения макрозообентоса в бухте Казачьей (Чёрное море) // Морские биотехнологические системы. – 2005. – № 3. – С. 90 – 94.
9. Морская санитарная гидробиология / Под общей ред. О. Г. Миронова: ИнБЮМ НАН Украины. – Севастополь, 1995. – 102 с.
10. Овсяный Е. И., Романов А. С., Игнатьева О. Г. Распределение тяжёлых металлов в поверхностном слое донных осадках Севастопольской бухты (Чёрное море) // Морск. гидрофиз. журн. – 2003. – № 2. – С. 85 – 93.
11. Определение загрязняющих веществ в пробах морских донных отложений и взвеси. Методические указания. – М.: ФСР по гидромет. и мониторинг. окр. среды. – 1996. – 46 с.
12. Пат. 65312 U UA, МПК C12N 1/16 Спосіб одержання накопичувальної культури морських дріжджів / Миронов О. Г. (UA), Дорошенко Ю. В. (UA), Єніна Л. В. (UA); заявник Інститут біології південних морів ім. О. О. Ковалевського НАН України (UA). – №а20104985; заявл. 26.04.2010; опубл. 12.12.2011, Бюл. №23, 2011.
13. Репетин Л. Н., Гордина А. Д., Павлова Е. В. и др. Влияние океанографических факторов на экологическое состояние Севастопольской бухты (Чёрное море) // Морск. гидрофиз. журн. – 2003. – № 2. – С. 66 – 80.
14. Рубцова С. И. Нефтеокисляющие бактерии как агенты самоочищения морской среды от углеводородов нефти // Вестн. СевНТУ. Механика. Энергетика. Экология. – 2003. – 48 – С. 165 – 172.
15. Санитарно-биологические исследования в прибрежной акватории региона Севастополя / Под общей ред. О. Г. Миронова: ИнБЮМ НАН Украины. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – 102 с.

Поступила 20 сентября 2012 г.
После доработки 15 января 2013 г.

Оцінка екологічного стану Севастопольських бухт за основними хімічними і мікробіологічними критеріями. С. І. Рубцова, О. А. Тіхонова, Н. В. Бурдян, Ю. В. Дорошенко. На основі санітарно-біологічної зйомки 2009 року і багаторічних даних відділу морської санітарної гідробіології ІнБПМ НАНУ розглянутий екологічний стан Севастопольських бухт, вивчена взаємодія морських організмів і їх співтовариств із забрудненням, складена класифікація Севастопольських бухт за ступенем екологічного неблагополуччя. Проаналізовані критерії оцінки екологічного стану морських берегових зон за основними хімічними і мікробіологічними показниками. Один з шляхів поліпшення екологічного стану акваторій заснований на створенні

штучних гідробіологічних систем для очищення забруднених морських вод і оздоровлення прибережних акваторій.

Ключові слова: нафтові вуглеводні, хлороформ–екстрагуєми речовини, Eh, рН, натуральна вологість, бактерії, дріжджі, прибережна зона, донні осідання, Чорне море.

The estimation of the ecological state of Sevastopol bays on basic chemical and microbiological criteria. S. I. Rubtsova, E. A. Tikhonova, N. V. Burdiyan, Yu. V. Doroshenko. The ecological state of the Sevastopol bays is considered on the basis of sanitary-biological survey of 2009 and long-term information of department of marine sanitary hydrobiology of IBSS NASU, co-operating of marine organisms and their associations is studied with contamination, done suggestion on the improvement of the ecological state of equatorials, classification of the Sevastopol bays is made on the degree of ecological situation. The criteria of estimation of the ecological state of marine waterside areas are analyzed on basic chemical and microbiological indexes. One way to improve of the ecological state of equatorials based on creation of the artificial hydrobiological systems for cleaning salt waters.

Keywords: oil hydrocarbons, chloroform-extracted matters, Eh, pH, natural humidity, bacteria, yeasts, coastal zone, bottom sediments, Black Sea.