

УДК 546.49:581.526..325.3:504.064.3:574 (262.5)

РТУТЬ, ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В СИСТЕМЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АКВАТОРИИ БАЛАКЛАВСКОЙ БУХТЫ

Поповичев В. Н., Стецюк А. П., Плотицына О. В., Попов М. А., Родионова Н. Ю., Царина Т. В.

*Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского, Севастополь,
popovichev@ukr.net, alex-ra-777@mail.ru, ovp3149@mail.ru*

Представлены результаты посезонного экологического мониторинга поверхностной воды во внутренней и внешней акваториях Балаклавской бухты (Крым, Черное море) в период 2012–2013 гг. По уровню эвтрофирования и загрязнения воды ртутью экологическая обстановка в акваториях бухты в целом характеризуется как удовлетворительная, за исключением места выпуска городских сточных вод.

Ключевые слова: ртуть, первичная продукция, экологический мониторинг, Балаклавская бухта.

ВВЕДЕНИЕ

Экологическое состояние прибрежной полосы моря зависит от совокупности природных и антропогенных факторов, которые необходимо учитывать при решении задач рационального природопользования. Неконтролируемое загрязнение прибрежной морской акватории из разных источников приводит к деградации экосистем и необратимым последствиям в импактных зонах.

Балаклавская бухта занимает особое место среди участков крымского побережья. Уникальная история, географическое расположение, природно-климатические факторы и геоморфологические особенности бухты открывают широкие возможности для развития здесь рекреационно-туристического комплекса. Превращение данной бухты в секретную базу подводного флота СССР на Черном море в 1961 г. стало причиной не только закрытия этого района для гражданских исследователей, но и исключило на долгие годы в научной литературе самого названия – «Балаклавская бухта». Изменение геополитической обстановки к началу 90-х годов XX века, а затем и вывод подводного флота позволили возобновить здесь научные исследования после длительного перерыва [6, 9, 10].

Нерациональное с экологической точки зрения использование акватории бухты и прилегающей к ней территории привело к серьезным последствиям, хотя некоторое снижение антропогенного пресса после вывода подводного флота положительно отразилось на экологическом состоянии бухты [10].

Однако, в связи с предполагаемым развитием здесь рекреационно-туристического комплекса, антропогенный пресс на экосистему бухты может резко усилиться. Сброс неочищенных бытовых сточных вод, дноуглубительные работы, промышленные стоки, ливневая канализация, утечки нефтепродуктов с судов, базирующихся и ремонтирующихся в бухте, смыв с полей и поступление удобрений и пестицидов с водами речки Балаклавка отрицательно сказываются на качестве вод. Небольшие размеры бухты, относительно примыкающих акваторий открытого моря, позволяют с одной стороны быстро восстанавливать естественные концентрации веществ и планктонных организмов в ее акватории за счет обмена с открытым морем, с другой стороны – ее извилистость и относительная замкнутость препятствуют процессам свободного водообмена. Перспективы развития здесь яхтинга, сопутствующего туризма и марикультуры априори предполагают высокие стандарты качества природной среды [10].

Целью работы являлся анализ исследовательского материала, полученного в ходе посезонного экологического мониторинга внутренней и внешней акваторий Балаклавской бухты в период 2012–2013 гг.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Представляемые нами данные получены в процессе мониторинга экологического состояния поверхностного слоя акватории Балаклавской бухты и смежного с нею залива Мегало-Яло

(Большой берег), проведенного посезонно в период 2012–2013 гг. В процессе исследований наше внимание было обращено на оценку биотических (первичная продукция (ПП) и концентрация общей взвеси ($C_{взв}$)) и абиотических (температура воды (T_v), ее соленость (S), содержание минеральных форм азота и фосфора) показателей среды рассматриваемой акватории, а также на уровень загрязнения ее ртутью (Hg), как одним из потенциально токсичных для биоты тяжелых металлов [5].

На рис. 1 показана карта месторасположения станций по отбору проб воды в ходе экологического мониторинга внутренней и внешней акваторий Балаклавской бухты, проведенного в период 2012–2013 гг., а в табл. 1 указаны координаты станций, дата отбора проб воды, а также ее температура (T_v , °C) и соленость (S , ‰).

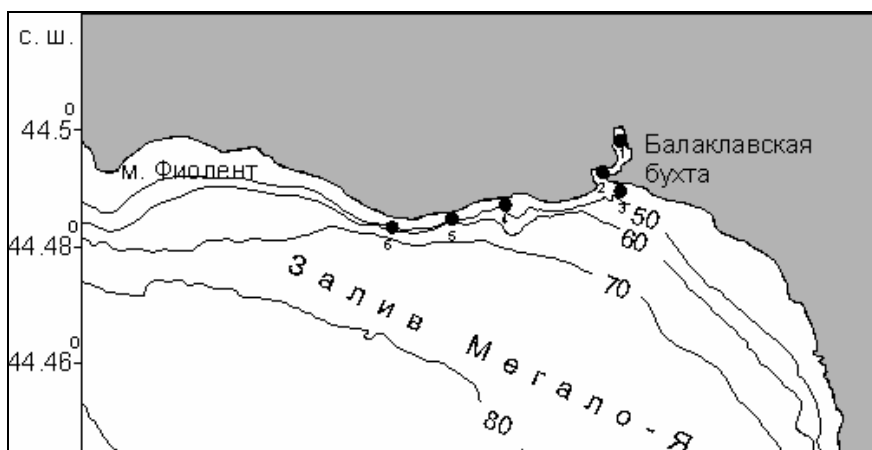


Рис. 1. Карта с указанием реперных станций (темные кружки) в акваториях Балаклавской бухты и смежного с ней залива Мегало-Яло, где проводился мониторинг экологического состояния поверхностной воды

Таблица 1

Координаты реперных станций во внутренней и внешней акваториях Балаклавской бухты, дата отбора проб воды, ее температура (T_v , °C) и соленость (S , ‰)

№ ст.	Север. широта	Восточ. долгота	22.08.2012		24.10.2012		14.01.2013		21.03.2013	
			T_v , °C	S , ‰	T_v , °C	S , ‰	T_v , °C	S , ‰	T_v , °C	S , ‰
1	44°30,07'	33°35,88'	18,61	17,76	19,59	18,15	7,97	18,00	9,16	17,83
2	44°29,74'	33°35,63'	18,25	17,82	19,55	18,13	8,49	17,89	9,24	17,86
3	44°29,60'	33°35,93'	15,40	17,84	19,61	18,14	8,65	17,81	9,23	17,94
4	44°29,46'	33°34,54'	17,23	17,88	19,57	18,15	8,86	18,03	9,31	17,99
5	44°29,31'	33°32,83'	18,84	17,91	19,55	18,12	8,86	18,03	9,25	18,00
6	44°29,30'	33°32,94'	19,64	17,81	19,45	18,11	8,88	18,05	9,29	17,97

Подготовку проб воды для измерения ртути проводили в лабораторных условиях по методу мониторинга фоновых загрязнений природной среды [15]. Пробы воды фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм и в фильтрате анализировали растворенную форму ртути, а на фильтрах – взвешенную. В основе выделения и измерения ртути из компонентов морских экосистем находится метод непламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии (метод холодного пара) [4, 13]. Измерения концентрации ртути проводили на анализаторе «Юлия-2» с чувствительностью 1 нг. Анализ серии проб показал удовлетворительную воспроизводимость данных с относительными ошибками, составившими 6,4 % для водного фильтрата и 13,4 % – для взвешенного вещества [5].

Для определения ПП органического вещества (ОВ) использовали радиоуглеродный метод, основанный на допущении, согласно которому внесенный в склянки меченый углерод (обычно в

форме $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ или $\text{NaN}^{14}\text{CO}_3$), включается в процессы фотосинтеза ОВ с той же скоростью, что и стабильный изотоп углерода (^{12}C) [1]. Определения ПП радиоуглеродным методом осуществляется по стандартной схеме: отбор проб воды, добавление изотопа, экспозиция, фильтрация и определение радиоактивности фильтров. Радиоуглеродной методикой «в модификации склянок» рекомендуется одновременно со светлыми склянками в тех же условиях экспонировать пробы воды в темных склянках и при расчете продукции за величину фотосинтеза принимается разность между фиксацией углекислоты в светлой и темной склянках. Поэтому, в процессе постановки экспериментов светлые и темные склянки с водой (объемом 67 мл) после внесения ^{14}C возвращали в условия близкие *in situ* на 1-суточную экспозицию, за время которой можно получить продукцию близкую к «чистой» ПП [1, 7, 11].

В основе расчета скорости продуцирования ОВ лежит формула: $C_{\phi} = C_k \times r / R$, где C_{ϕ} – величина фотосинтеза за время экспозиции, $\text{мгC} \times \text{л}^{-1}$; C_k – общее количество углерода во всех формах углекислоты в воде (CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-}), $\text{мгC} \times \text{л}^{-1}$; r – радиоактивность, приобретенная фитопланктоном за время экспозиции, $\text{кБк} \times \text{л}^{-1}$; R – радиоактивность, внесенная в опытные склянки, измеренная при тех же условиях, что и r , и выраженная в тех же единицах ($\text{кБк} \times \text{л}^{-1}$) [7].

При расчете ПП фитопланктона для акваторий вблизи Севастополя нами использовалось значение $C_k = 36 \text{ мгC} \times \text{л}^{-1}$, в соответствие с работой [3]. Исходная радиоактивность ^{14}C в склянках (R) составляла $50 \text{ кБк} \times \text{л}^{-1}$, относительная погрешность определения ПП – 18 %. Радиометрические измерения ^{14}C в аликвотах воды из инкубируемых склянок и во взвеси, осажденной на фильтрах, проводили на жидкостно-сцинтилляционном бета-спектрометре «RackBeta – 1219» с использованием сцинтилляционной жидкости «OptiPhase – II» и периодическим контролем работы прибора по прилагаемому ^{14}C -стандарту.

Концентрацию взвешенного вещества ($C_{\text{взв}}$, $\text{мг}(\text{сух}) \times \text{л}^{-1}$) в пробах поверхностной воды определяли методом «мембранного фильтрования» [2]. Нуклеопоровые фильтры с размером пор 0,45 мкм взвешивали на микроаналитических весах «Sartorius», чувствительностью 0,1 мг, затем фильтровали через них 0,5 – 1,5 л воды. Фильтры с осажденной взвесью высушивали и взвешивали. Средняя относительная погрешность определения концентрации взвеси составила 32 %.

Гидрохимические параметры проб воды определялись в аккредитованной гидрохимической лаборатории отдела аквакультуры и морской фармакологии ИнБИОМ НАНУ согласно «Руководству по химическому анализу морских вод» [14] и в соответствии с ДСТУ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ртуть (Hg). Содержание растворенной, взвешенной и общей (суммарной) форм ртути в поверхностной воде внутренней и внешней акватории Балаклавской бухты, определенное в ходе ее сезонного мониторинга с лета 2012 г. по весну 2013 г. иллюстрирует рис. 2 в виде гистограммной интерпретации. Такое представление данных по сравнению с табличным наиболее зримо выявляет экстремальные значения концентрации ртути как по ее формам, так и станциям, и сезонам года. Например, на рис. 2А видно, что наибольшее значение общей формы ртути ($124,3 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$) зарегистрировано на станции №1 (Ст-1), находящейся в кутовой части бухты, причем, определяющее значение приходится на растворенную ее форму ($93,0 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$). В целом для летней съемки, выполненной 22 августа 2012 г., значения концентрации общей формы Hg варьируются в диапазоне от 9,9 до $124,3 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$, растворенной – от 8,0 до $93,0 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$ и взвешенной – от 1,9 до $31,3 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$.

Осенняя мониторинговая съемка, проведенная 24 октября 2012 г., зафиксировала максимальные значения концентрации Hg на трех станциях (Ст-1, Ст-3 и Ст-5) и также с преобладающим содержанием растворенной ее формы (рис. 2Б), и диапазоны значений составляли размах: 7,0 – $279,0 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$ для растворенной формы; 2,7 – $72,3 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$ для взвешенной и 26,7 – $281,9 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$ для общей формы Hg, причем, это были максимальные уровни концентрации ртути за все проведенные съемки в период 2012 – 2013 гг.

Результаты «полевых» съемок, проведенных зимой (14 января) и весной (21 марта) 2013 г., дали относительно низкие значения содержания изучаемых форм ртути в воде по сравнению с

летней и осенней съемками, с относительными экстремумами значений Hg на Ст-4 (рис. 2В) и на Ст-3 (рис. 2Г). Соответствующие диапазоны значений концентрации Hg для зимней и весенней съемок имели размах: 2,0 – 61,0 нг×л⁻¹ и 0,0 – 49,0 нг×л⁻¹ для растворенной формы; 3,6 – 8,2 нг×л⁻¹ и 1,8 – 29,0 нг×л⁻¹ для взвешенной; 6,6 – 66,4 нг×л⁻¹ и 1,8 – 57,0 нг×л⁻¹ для общей формы ртути.

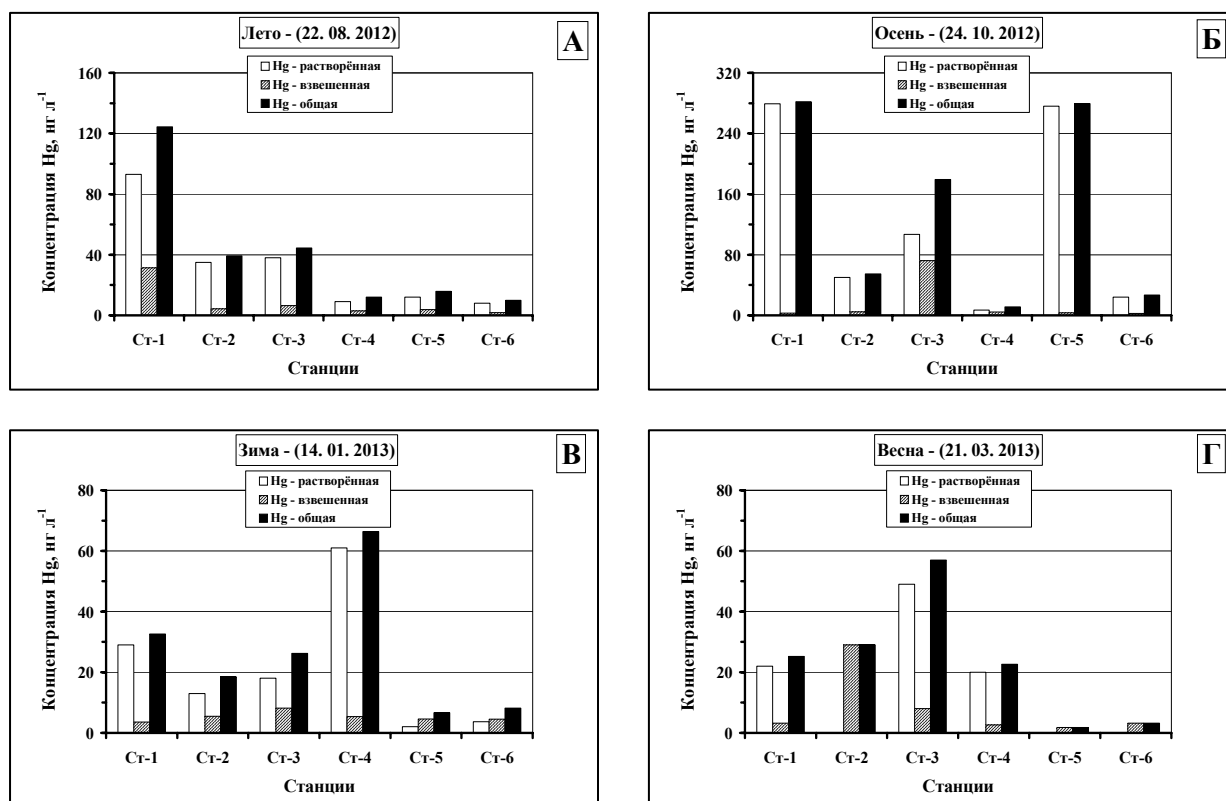


Рис. 2. Концентрация разных форм ртути (растворенная, взвешенная и общая) в поверхностной воде акватории Балаклавской бухты

Ст-1 и Ст-2 – станции внутри бухты, Ст-3 – Ст-6 – вне бухты; А – лето, Б – осень, В – зима, Г – весна.

В целом полученные результаты свидетельствуют о пока еще удовлетворительной экоситуации в отношении загрязнения ртутью поверхностной воды акваторий Балаклавской бухты. Это следует из сравнения наших данных с величиной предельно допустимой концентрации (ПДК) ртути для воды (100 нг×л⁻¹) рыбохозяйственных водоемов [8, 12], а также с литературными данными [5]. Вместе с тем необходимо обратить внимание на значения суммарной формы ртути, эпизодически превышающие данный уровень ПДК, особенно для кутовой части Балаклавской бухты, а также для внешней ее акватории, подверженной влиянию выпуска сточных вод городским коллектором вблизи мыса «Балаклавский» (Ст-3).

Первичная продукция и концентрация взвеси. Результаты 1-суточных экспериментов с ¹⁴C по определению скорости продуцирования ОВ в поверхностной воде акваторий Балаклавской бухты в разные годовые сезоны и выраженные значениями ПП (мгС×м⁻³×сут⁻¹) представлены в полулогарифмическом масштабе на рис. 3А. Максимальные их значения в основном приурочены к внутренней акватории бухты (Ст-1 и Ст-2) и к летне-осеннему периоду года, когда температура воды и световые условия оптимальны для развития фитопланктона [11, 16, 17].

В целом для внутренней и внешней акваторий бухты полученные величины ПП варьируют в пределах: 12,3 – 172,9 мгС×м⁻³×сут⁻¹ – летом; 10,0 – 84,7 мгС×м⁻³×сут⁻¹ – осенью; 3,5 – 8,3 мгС×м⁻³×сут⁻¹ – зимой и 3,6 – 43,9 мгС×м⁻³×сут⁻¹ – весной. Летние значения ПП в воде внутренней акватории бухты близки и превышают условный уровень эвтрофности, определенный по летним оценкам ПП для северо-западной части Черного моря и равный 100 мгС×м⁻³×сут⁻¹ [17].

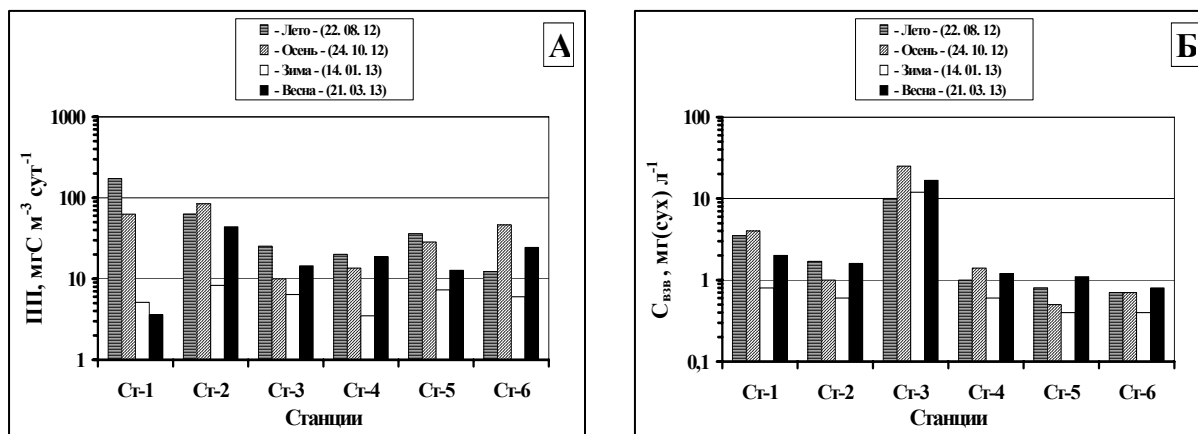


Рис. 3. Первичная продукция (А) и концентрация общей взвеси (Б) в поверхностной воде акваторий Балаклавской бухты в разные сезоны года

Ст-1 и Ст-2 – станции внутри бухты, Ст-3 – Ст-6 – вне бухты.

На рис. 3Б, также в полулогарифмическом масштабе, представлены результаты определения концентрации взвешенного вещества ($C_{\text{взв}}$, $\text{mg}(\text{сух}) \times \text{l}^{-1}$) в поверхностной воде изучаемых акваторий. Они свидетельствуют о преобладании во все сезоны года содержания взвеси в воде на Ст-3, приуроченной к месту выпуска сточных вод Балаклавского коллектора. При этом, диапазоны значений $C_{\text{взв}}$ имеют соответствующий сезонный размах, обусловленный совокупностью биотических и абиотических факторов: $0,7 - 10,0 \text{ mg}(\text{сух}) \times \text{l}^{-1}$ – летом; $0,5 - 25,0 \text{ mg}(\text{сух}) \times \text{l}^{-1}$ – осенью; $0,4 - 12,0 \text{ mg}(\text{сух}) \times \text{l}^{-1}$ – зимой и $0,8 - 16,7 \text{ mg}(\text{сух}) \times \text{l}^{-1}$ – весной.

Содержание минеральных форм азота и фосфора. Гидрохимический режим вод Балаклавской бухты формируется под воздействием гидрометеорологических условий, сгонно-нагонных явлений и антропогенного воздействия. Известно [9, 10], что наиболее загрязнена мелководная кутовая часть бухты, принимающая сточные и ливневые воды, что в значительной мере обусловлено ограниченным водообменом через основную ее узкость. Объем поступающих в бухту сточных вод оценивается в $4,4 \text{ млн. м}^3 \times \text{год}^{-1}$, из которых $3,0 \text{ млн. м}^3 \times \text{год}^{-1}$ проходит через главный коллектор. Не менее значимый источник загрязнения – стоки, поступающие в бухту с водами реки Балаклавка в объеме $169,6 \text{ тыс. м}^3 \times \text{год}^{-1}$. Ветровые условия определяют интенсивность перемешивания вод, и тем самым, оказывают влияние на экологическое состояние бухты.

На рис. 4 приведены результаты гидрохимических исследований по определению в изучаемых акваториях Балаклавской бухты содержания минеральных форм азота (NO_2 , NO_3 , NH_4) и фосфора (PO_4), являющихся основными биогенными элементами, влияющими на биопродуктивность вод. Из представленного материала значимо выделяются данные по концентрации этих соединений, зарегистрированных в пробах воды на Ст-3, приуроченной к выпуску сточных вод городской канализации. В целом содержание нитритного азота (NO_2) изменялось в диапазоне от $0,1$ до $35,3 \text{ мкг} \times \text{л}^{-1}$ (рис. 4А), нитратного (NO_3) – от $1,4$ до $127,0 \text{ мкг} \times \text{л}^{-1}$ (рис. 4Б), аммонийного (NH_4) – от $3,5$ до $1174,1 \text{ мкг} \times \text{л}^{-1}$ (рис. 4В) и фосфатов (PO_4) – от $0,7$ до $341,7 \text{ мкг} \times \text{л}^{-1}$ (рис. 4Г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены количественные оценки биотических и абиотических факторов водной среды, обуславливающих и отражающих экологическое состояние внутренней и внешней акваторий Балаклавской бухты. Полученные данные свидетельствуют, что по уровню эвтрофирования и загрязнения воды ртутью экологическая обстановка в акваториях бухты в целом характеризуется как удовлетворительная, за исключением места выпуска городских сточных вод.

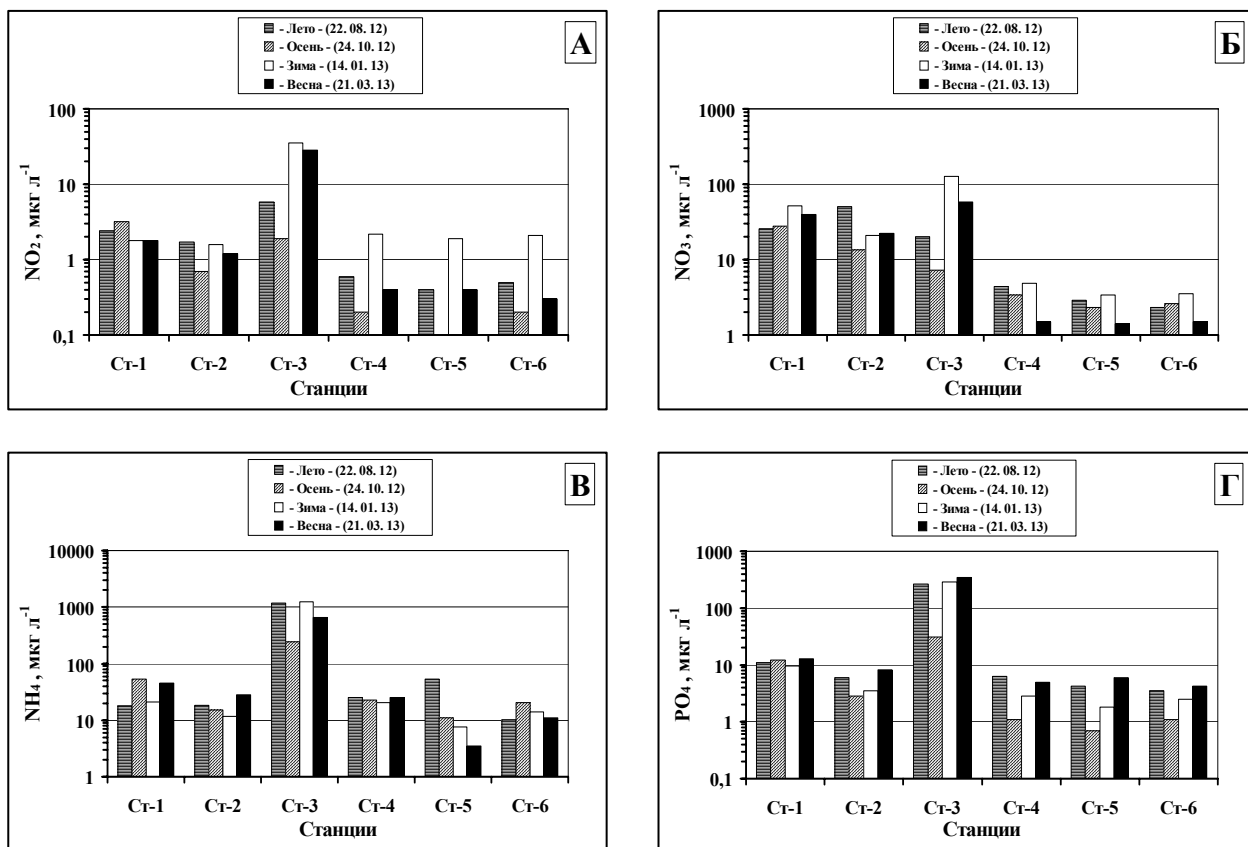


Рис. 4. Концентрации нитритов (А), нитратов (Б), аммония (В) и фосфатов (Г) в поверхностной воде акватории Балаклавской бухты в разные сезоны года

Ст-1 и Ст-2 – станции внутри бухты, Ст-3 – Ст-6 – вне бухты.

Вместе с тем экологическая обстановка в бухте может быть улучшена путем введения новых и модернизации существующих очистительных сооружений, а также развития на ее акватории мидийных ферм. Из неотложных мер по снижению антропогенного пресса на экосистему рассматриваемой акватории несомненно важным является перенос оголовка выпуска городских хозяйственно-бытовых вод и заглубление его под основной черноморский пикноклин [10].

Список литературы

1. Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов / Г. Г. Винберг. – Минск: АН БССР, 1960. – 329 с.
2. Витюк Д. М. Взвешенное вещество и его биогенные компоненты / Д. М. Витюк. – Киев: Наук. думка, 1983. – 212 с.
3. Игнатъева О. Г. Состояние компонентов карбонатной системы вод Севастопольской бухты по данным экспедиционных исследований 2006–2007 гг. / О. Г. Игнатъева // Морск. экологич. журн. – 2009. – Т. VIII. – № 2. – С. 37–48
4. Игошин А. М. Беспламенный атомно-абсорбционный метод определения ртути в воде / А. М. Игошин, Л. Н. Богусевич // Гидрохимические материалы. – 1969. – Т. 47. – С. 150–156.
5. Костова С. К. Распределение ртути в акватории черноморского побережья Крыма / С. К. Костова, В. Н. Поповичев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. научн. тр. – Севастополь, 2002. – Вып. 1 (6). – С. 118–127.
6. Ломакин П. Д. Современное состояние основных компонентов экосистемы Балаклавской бухты по материалам комплексного мониторинга ИнБЮМ НАН Украины / П. Д. Ломакин, М. А. Попов // Вестник Гидрометцентра Черного и Азовского морей. – 2011. – Выпуск 1 (12). – С. 83–95.
7. Методическое пособие по определению первичной продукции органического вещества в водоемах радиоуглеродным методом. – Минск: Белгосуниверситет, 1960. – 26 с.
8. Перечень предельно допустимых концентраций и ориентировочно безопасных уровней воздействия вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов. – М.: Медикор, 1995. – 220 с.

9. Попов М. А. Комплексный мониторинг вод Балаклавской бухты / М. А. Попов, Н. П. Ковригина, Е. В. Лисицкая // Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и мировом океане (юбилейный выпуск): Сб. научных трудов. – Керчь: ЮгНИРО, 2008. – Т. 46. – С. 118–124.
10. Попов М. А. Океанологическая характеристика Балаклавской бухты, оценка загрязнения ее вод и прилегающей акватории Черного моря: дис. ... канд. геогр. наук. – Севастополь, 2013. – 162 с.
11. Поповичев В. Н. Продукционные характеристики биотического компонента природной взвеси в системе экологического мониторинга акватории Балаклавской бухты в 2012 г. / В. Н. Поповичев, М. А. Попов, Н. Ю. Родионова, Т. В. Царина // Материалы науч. конф. «Ломоносовские чтения» 2013 г. и Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2013» / Под ред. М. Э. Соколова, Г. А. Голубева, В. А. Иванова, Н. Н. Миленко, В. В. Хапаева. – Севастополь: ООО «Экспресс-печать», 2013. – С. 45–46.
12. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе и воде: Справочное пособие / С. Л. Томарченко. – М.: Химия, 1972. – 375 с.
13. Прокофьев А. К. Методы определения токсичных загрязняющих веществ в морской воде и донных осадках / А. К. Прокофьев, Т. В. Степанченко. – М.: Гидрометеоздат, 1981. – С. 34–42.
14. Руководство по химическому анализу морских вод (РД52.10.243-293). – СПб.: Гидрометеоздат, 1993. – 264 с.
15. Унифицированные методы мониторинга фонового загрязнения природной среды. – М.: Гидрометеоздат, 1986. – 180 с.
16. Финенко З. З. Продукция фитопланктона / З. З. Финенко // Основы биологической продуктивности Черного моря. – Киев: Наук. думка, 1979. – С. 88–99.
17. Финенко З. З. Региональная модель для расчета первичной продукции Черного моря с использованием данных спутникового сканера цвета SeaWiFS / З. З. Финенко, В. В. Суслин, Т. Я. Чурилова // Морск. экологич. журн. – 2009. – Т. VIII, № 2. – С. 81–106.

Поповичев В. М., Стецюк О. П., Плотичина О. В., Попов М. О., Родионова Н. Ю., Царина Т. В. Ртуть, первичная продукция и гидрохимические параметры в системе экологического мониторинга поверхностного слоя акватории Балаклавской бухты // Экосистемы, их оптимизация та охорона. Симферополь: ТНУ, 2014. Вип. 11. С. 99–105.

Представлені результати сезонного екологічного моніторингу поверхневої води у внутрішній і зовнішній акваторіях Балаклавської бухти (Крим, Чорне море). За рівнем евтрофування та забруднення води ртуттю екологічна обстановка в акваторіях бухти в цілому характеризується як задовільна, за винятком місця випуску міських стічних вод.

Ключові слова: ртуть, первична продукція, екологічний моніторинг, Балаклавська бухта.

Popovichev V. N., Stetsyuk A. P., Plotitsina O. V., Popov M. A., Rodionova N. Yu., Tsarina T. V. Mercury, primary production and hydrochemical parameters in the system of ecological monitoring of the surface layer of water area in Balaklava bay // Optimization and Protection of Ecosystems. Simferopol: TNU, 2014. Iss. 11. P. 99–105.

The results of the seasonal environmental monitoring of surface water in internal and external areas of the Balaklava Bay (Crimea, Black sea) are presented. In general considering the level of eutrophication and water pollution by mercury the ecological situation in the waters of the Bay is characterized as satisfactory, except the place where municipal wastewater is entering the basin.

Key words: mercury, primary production, environmental monitoring, Balaklava Bay.

Поступила в редакцію 13.03.2014 г.