

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 551.464.34

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ УГРОЗЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ ВОД СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ

С.И. Кондратьев¹, Н.А. Орехова²

^{1,2} *Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
отдел биогеохимии моря, Севастополь*

¹ *Ст. науч. сотр., канд. хим. наук; e-mail: skondratt@mail.ru*

² *Канд. геогр. наук, заведующий Лабораторией мониторинга и исследования парниковых газов и кислорода
в морской среде; e-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru*

Целью данной работы является обсуждение основных экологических проблем состояния вод Севастопольской бухты и выявление причин, влияющих на это состояние. Четыре сезонные съемки акватории Севастопольской бухты в 2022 г. подтвердили основополагающее влияние на гидрохимический состав вод бухты стока реки Черной, который служит одним из основных источников биогенных элементов.

При этом отмечено, что на гидрохимические характеристики вод Южной бухты преимущественное влияние оказывают не воды реки Черной, а пресноводный сток в кутовой части данного района. Предположено, что этот сток является постоянным, а не аварийным, как считали ранее. При ветрах южного румба возможно распространение вод Южной бухты к центральной части Севастопольской бухты, что негативно отразится на состоянии ее экосистемы.

В летний период в кутовой части Артиллерийской бухты, рядом с которой находится городской пляж «Хрустальный», зафиксировано появление дополнительного источника ионов аммония, концентрация которых в 80 раз превышала фоновую. Так как аммоний является продуктом окисления органического вещества, его появление может указывать на преобладание деструкционных процессов, что негативно отражается на условиях существования биологических организмов и в целом на экологическом состоянии вод.

В теплое время года на акватории Севастопольской бухты в придонных водах искусственно созданного углубления под плавучим доком наблюдается постоянный дефицит кислорода, который в некоторых случаях приводит к образованию сероводорода.

Все отмеченные угрозы негативно отражаются на условиях существования биологических организмов, экологическом состоянии всей экосистемы и рекреационном потенциале бухты.

Ключевые слова: гидрохимический состав вод, экология, сероводородное загрязнение, натурные данные

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.1

ВВЕДЕНИЕ

Исследование гидрохимического состава вод Севастопольской бухты началось относительно недавно, в конце XX в. Постепенно были выявлены основные факторы, определяющие гидрологический и гидрохимический режимы вод бухты, а также определены некоторые районы, экологическое состояние которых вызывало опасение. В данной работе на базе результатов четырех сезонных экспедиций (зима, весна, лето, осень), предпринятых в 2022 г., обсуждаются конкретные потенциальные угрозы экологическому состоянию вод бухты.

Севастопольская бухта представляет собой полузамкнутый водоем эстуарного типа с ограничен-

ным водообменом с открытой частью моря. Ее протяженность с запада на восток составляет примерно 7,5 км, при ширине от 100 м в восточной части до 800 м в районе выхода из бухты. Примерно в 2 км от входа в бухту имеется ответвление на юг протяженностью около 2,5 км и шириной от 500 м на входе до 100 м в кутовой части, этот район называют Южной бухтой [Иванов и др., 2006].

В 1970-х гг. при входе в бухту были возведены два мола, защищающих ее от юго-западных штормов, в результате чего ширина входа уменьшилась почти в два раза — до 550 м. Это привело к ослаблению течения, направленного на восток вдоль южного берега центральной части бухты,

что заметно ухудшило «вентилирование» вод бухты водами открытого моря – величина водообмена снизилась на 40–70% [Иванов и др., 2006]. В настоящее время направление течений в бухте определяется преимущественно ветрами, которые или приносят в бухту поверхностные воды открытого моря, и тогда возникает компенсационное течение придонных вод из бухты, или же, наоборот, поверхностные воды бухты уходят в открытое море, а компенсационное течение приносит придонные воды [Совга и др., 2022].

Активное использование в течение двух веков Севастопольской бухты в народно-хозяйственных целях привело к снижению ее рекреационных возможностей. Застройка берегов бухты сопровождалась активной эксплуатацией ее экосистемы в качестве зоны активного судоходства, стоянки и ремонта судов. В итоге сложилась ситуация, когда в акватории бухты возникло более 30 локальных источников хозяйственных, канализационных и ливневых стоков (рис. 1) [Грузинов и др., 2019; Рябцев и др., 2021].

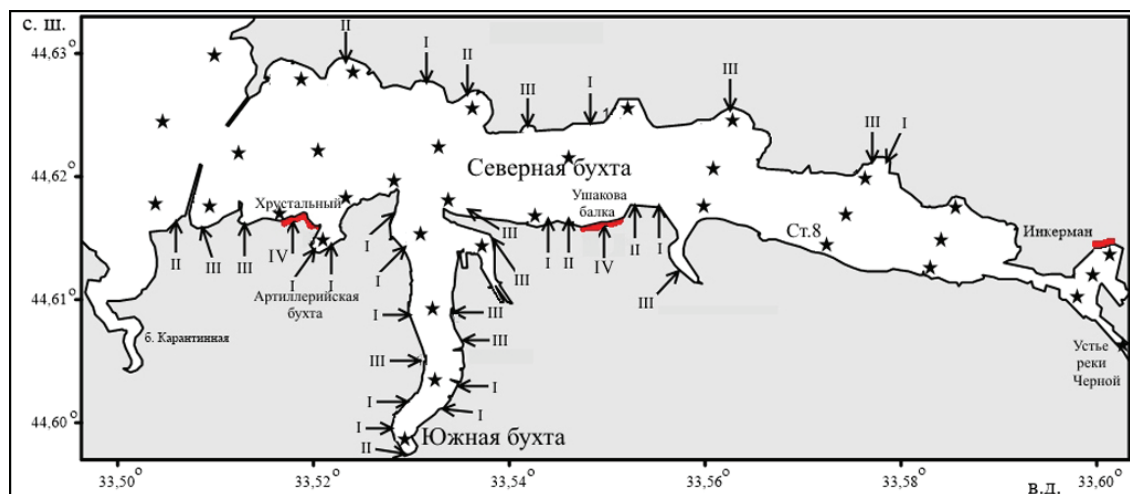


Рис. 1. Расположение различных стоков по [Грузинов и др., 2019] и схема 36 станций отбора проб (отмечены звездочками) в Севастопольской бухте:

I – выпуск сточных вод ливневой канализации; II – аварийный выпуск сточных вод без очистки;
III – выпуск сточных вод без очистки; IV – действующие пляжи

Fig. 1. Location of various effluents according to [Gruzinov et al., 2019] and a scheme of 36 sampling stations (marked with asterisks) in the Sevastopol Bay:

I – discharge of storm sewer wastewater; II – emergency release of wastewater without treatment;
III – release of wastewater without treatment; IV – active beaches

Одним из важных факторов, определяющих экологическое состояние бухты, является пресноводный сток в кутовые части «центральной» и Южной бухт, куда пресные воды поступают постоянно с различной интенсивностью в зависимости от сезона. В кутовую часть бухты впадает река Черная, в Южную, по данным [Грузинов и др., 2019; Рябцев и др., 2021], выходит аварийный выпуск сточных вод, однако объем поступающих вод не установлен. При этом в данном районе нами постоянно фиксируется присутствие менее соленых вод в поверхностном слое по сравнению с придонным слоем и остальными районами бухты.

По данным многолетних исследований [Иванов и др., 2006; Овсяный и др., 2007; Багаев и др., 2022; Совга, Хмара, 2020; Орехова и др., 2018; Орехова, Вареник, 2018; Орехова и др., 2019] установлено, что сток реки Черной оказывает основное влияние на гидролого-гидрохимический состав вод всей Се-

вастопольской бухты. При этом вклад пресноводного стока в кутовой части Южной бухты не изучался, хотя, как будет показано ниже, он в значительной степени влияет на гидрохимические характеристики и экологическое состояние вод Южной бухты.

Подробное изучение экологии вод началось только в конце 1990-х гг., до этого исследования Севастопольской бухты были ограничены. Обобщающим трудом десятилетних исследований стал препринт [Иванов и др., 2006], в котором, прежде всего, было обосновано определяющее влияние стока реки Черной на состав вод, а также проведено районирование бухты по уровню загрязнения различными биохимическими компонентами.

Качественные изменения в изучении состояния вод и донных осадков Севастопольской бухты произошли в 2007 г., когда Морским гидрофизическим институтом (МГИ) были организованы ежеквартальные экспедиции не только в акватории бухты,

но и в нижнем течении реки Черной. При этом количество точек отбора проб в бухте было увеличено до 36, что позволило регулярно получать данные о гидролого-гидрохимических характеристиках вод не только на фарватере бухты, но и в прибрежных районах (см. рис. 1).

Систематические исследования вод бухты позволили выделить в ней наиболее неблагоприятные районы. В частности, в районе ст. 8 в придонных водах в сентябре 2009 г. на глубине 20 м был обнаружен сероводород с концентрацией около 40 мкМ [Кондратьев, Видничук, 2020]. Для сравнения, воды Черного моря содержат сероводород в такой концентрации примерно на глубине 250 м [Кондратьев, Видничук, 2018]. Данное явление носило эпизодический характер, однако проблема развития дефицита кислорода и гипоксии (концентрация кислорода менее 63 мкМ, или 30% насыщения [Diaz, 2001; Zhang et al., 2010]), в придонном слое вод в данном районе приобрела сезонный характер [Кондратьев, Видничук, 2020].

С тех пор на основании данных, полученных МГИ для вод реки Черной, вод и донных осадков Севастопольской бухты, были опубликованы многочисленные работы [Багаев и др., 2022; Совга, Хмара, 2020; Орехова и др., 2018; Орехова, Вареник, 2018; Орехова и др., 2019; Кондратьев, Видничук, 2020], проведено районирование акватории бухты по степени загрязнения.

Целью данной работы стало обобщение выводов всех проведенных исследований, оценка наиболее экологически неблагополучных районов бухты и выявление причин, которые создают угрозы для экологии бухты. При этом были использованы данные 2022 г. по содержанию гидрохимических компонентов в водах бухты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Четыре сезонных съемки Севастопольской бухты по схеме из 36 станций (см. рис. 1), были проведены в феврале, апреле, сентябре и ноябре 2022 г. Пробы отбирались на двух горизонтах – с поверхности и на глубине 1 м от дна. Далее они доставлялись в стационарную береговую лабораторию и немедленно анализировались. Перед анализом растворенных минеральных форм биогенных элементов (кремниевая кислота, фосфаты, нитраты, нитриты, аммоний) пробы морской воды предварительно фильтровались через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм. Далее все пробы, в том числе и на определение концентрации ионов аммония, анализировались фотометрически согласно [Методы..., 1978; Современные методы..., 1992]. Величину pH определяли потенциометрически в открытой ячейке с калибровкой по буферным растворам шкалы NBS,

общую щелочность – методом прямого титрования с потенциометрическим окончанием.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности гидрохимического состава вод Севастопольской бухты в значительной степени определяются пресноводным стоком реки Черной и пресноводного источника, впадающего в куттовую часть Южной бухты. Таким образом, основное внимание при оценке антропогенного влияния обращено на пространственно-временную изменчивость гидрохимических характеристик поверхностного слоя вод бухты (табл.). В придонном слое вод изменения этих характеристик менее контрастны и проявлялись преимущественно в теплый период (август – сентябрь), когда состав вод на ст. 8 под плавучим доком традиционно отличался от ближайших станций – повышенное содержание биогенных элементов и дефицит кислорода.

Максимальные концентрации элементов главного биогенного и карбонатных циклов в поверхностных водах бухты следует ожидать в феврале, когда скорость их извлечения в процессе фотосинтеза минимальна.

В этот период влияние реки Черной на гидрохимические характеристики вод бухты максимально, что наилучшим образом отражается на распределении величины щелочности (рис. 2). В приустьевом районе реки Черной наблюдается максимальная для бухты величина щелочности (около 4 мМ), по мере удаления от устья к выходу из бухты она плавно уменьшается до 3,5 мМ. При этом отмечается монотонное уменьшение величины щелочности с глубиной (см. рис. 2Б). То есть можно отметить, что приустьевой район служит своеобразным фильтром, ослабляющим поступление в бухту различных веществ с речным стоком.

Среди элементов главного биогенного цикла в работе рассматриваются изменения концентраций фосфатов, кремниевой кислоты, нитратов и ионов аммония в поверхностном слое вод. Так как распределение нитратов и нитритов аналогично, последние не обсуждаются, однако их концентрация на порядок меньше. На всех приводимых ниже рисунках следует обратить внимание на повышенные концентрации биогенных элементов в куттовой части Южной бухты.

На рис. 3 показано изменение содержания фосфатов в поверхностных водах Севастопольской бухты в 2022 г. В зимний период происходит накопление фосфатов и наблюдаются их повышенные концентрации (0,09–0,94 мкМ, средняя – 0,22 мкМ). Максимальные концентрации отмечены в куттовой части Южной бухты, повышенные – в устье реки Черной.

Весной их содержание значительно снижается, до ~0,04 мкМ. Максимальные концентрации также отмечаются в кутовой части Южной бухты и устье реки Черной (0,25 мкМ). К осени (сентябрь) в боль-

шей части бухты содержание фосфатов преимущественно ниже предела обнаружения (0,02 мкМ), а в ноябре начинается постепенное увеличение концентраций до 0,05–0,10 мкМ.

Таблица

Результаты химического анализа вод в Севастопольской бухте в 2022 г.

Время съёмки		Февраль			Апрель		
Элемент	Горизонт	Пределы	Среднее	σ	Пределы	Среднее	σ
Кислород, мл/л	поверхность	6,95–8,41	7,59	0,26	5,91–8,23	7,06	0,32
	дно	2,62–7,44	6,73	0,74	3,97–7,43	6,82	0,62
Кислород, насыщение, %	поверхность	91,1–103,5	97,5	2,33	90,4–117,7	105,2	4,1
	дно	34,7–98,3	90,3	10,1	56,4–108,4	96,8	9,1
Фосфаты, мкМ	поверхность	0,09–0,94	0,22	0,14	0,00–0,59	0,04	0,11
	дно	0,05–0,26	0,14	0,06	0,00–0,08	0,02	0,02
Кремнекислота, мкМ	поверхность	7,21–61,2	21,1	11,1	2,67–75,3	8,8	14,2
	дно	4,69–20,2	7,34	2,91	2,31–6,02	4,09	0,74
Нитраты, мкМ	поверхность	2,62–379,4	22,5	61,8	2,14–301,2	16,4	50,4
	дно	0,03–20,41	3,69	3,70	0,00–13,7	1,77	2,37
Нитриты, мкМ	поверхность	0,07–1,33	0,33	0,21	0,07–1,62	0,32	0,28
	дно	0,05–0,47	0,26	0,12	0,00–0,37	0,17	0,10
Аммоний, мкМ	поверхность	0,49–4,11	1,92	0,86	0,07–5,29	0,72	1,02
	дно	0,36–2,43	0,86	0,44	0,00–0,86	0,29	0,22
Щелочность, мг-экв/кг	поверхность	3,411–3,984	3,567	0,147	3,362–4,082	3,486	0,160
	дно	3,377–3,567	3,417	0,035	3,361–3,471	3,387	0,024
Время съёмки		Сентябрь			Ноябрь		
Кислород, мл/л	поверхность	4,22–5,40	5,00	0,31	–	–	–
	дно	2,39–5,32	4,68	0,57	–	–	–
Кислород, насыщение, %	поверхность	79,1–101,6	93,1	6,0	–	–	–
	дно	44,0–100,0	86,4	11,3	–	–	–
Фосфаты, мкМ	поверхность	0,00–3,75	0,23	0,74	0,01–1,75	0,15	0,29
	дно	0,00–1,54	0,07	0,26	0,01–0,23	0,08	0,06
Кремнекислота, мкМ	поверхность	2,24–66,5	7,46	10,8	1,39–138,4	8,42	22,44
	дно	2,63–14,4	5,48	2,66	1,52–11,0	4,22	1,74
Нитраты, мкМ	поверхность	0,00–233,5	8,8	38,7	1,01–352,0	17,7	67,1
	дно	0,00–5,54	1,07	1,17	0,93–4,33	2,59	0,87
Нитриты, мкМ	поверхность	0,05–3,70	0,33	0,62	0,03–3,41	0,25	0,64
	дно	0,00–0,41	0,18	0,12	0,01–0,19	0,10	0,05
Аммоний, мкМ	поверхность	0,06–82,9	5,69	15,7	0,04–15,6	1,94	2,89
	дно	0,20–20,6	2,97	4,76	0,00–5,18	1,34	1,21
Щелочность, мг-экв/кг	поверхность	–	–	–	3,345–3,584	3,366	0,040
	дно	–	–	–	3,345–3,395	3,357	0,012

Таким образом, во всех сезонах основным источником фосфатов является пресноводный сток в Южной бухте, где их содержание в кутовой части в 5–10 раз больше (0,6–1,7 мкМ по сравнению с 0,1–0,01 мкМ в

зависимости от сезона), чем в остальной части бухты. Содержание фосфатов в приустьевой области реки Черной изменялось в течение года от 0,25 до 0,38 мкМ и было заметно ниже (в 3–10 раз), чем в Южной бухте.

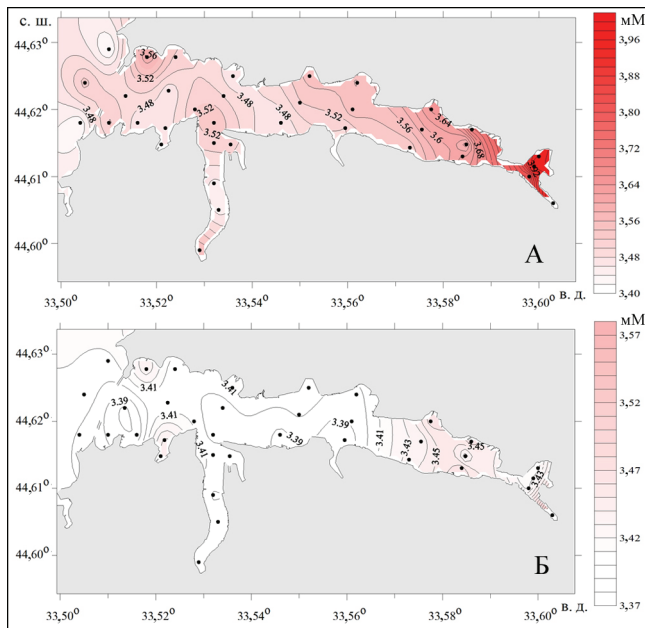


Рис. 2. Пространственное распределение щелочности (в мМ) в поверхностных (А) и придонных (Б) водах Севастопольской бухты в феврале 2022 г.

Fig. 2. Spatial distribution of alkalinity (in mM) in surface (A) and bottom (B) waters of the Sevastopol Bay in February 2022

В содержании кремнекислоты в поверхностных водах наблюдались те же тенденции – накопление в феврале (концентрации для большей части акватории на уровне 20 мкМ), затем уменьшение до 5–7 мкМ в апреле с минимумом их концентрации в сентябре (3–5 мкМ) и постепенное увеличение содержания в ноябре (в среднем 5–8 мкМ) (рис. 4). Вклад пресноводных источников кремнекислоты в бухте изменялся в зависимости от сезона: в феврале содержание кремнекислоты в кутовой части Южной бухты не отличалось от фонового, тогда как в приустьевом районе реки Черной концентрации были в 2–3 раза выше фоновых (50–60 мкМ). В апреле вклад стока, выходящего в устье Южной бухты, был преобладающим – максимальная концентрация наблюдалась в кутовой части Южной бухты (75 мкМ), а в приустьевой области реки Черной изменялась в диапазоне 20–50 мкМ. В сентябре и ноябре основным источником силикатов также был пресноводный сток в Южную бухту, там содержание кремнекислоты было примерно в 10 раз выше фонового и достигало 70 мкМ. В приустьевой части реки Черной их концентрация изменялась в пределах 10–13 мкМ, что было незначительно выше средней величины в бухте в данный период.

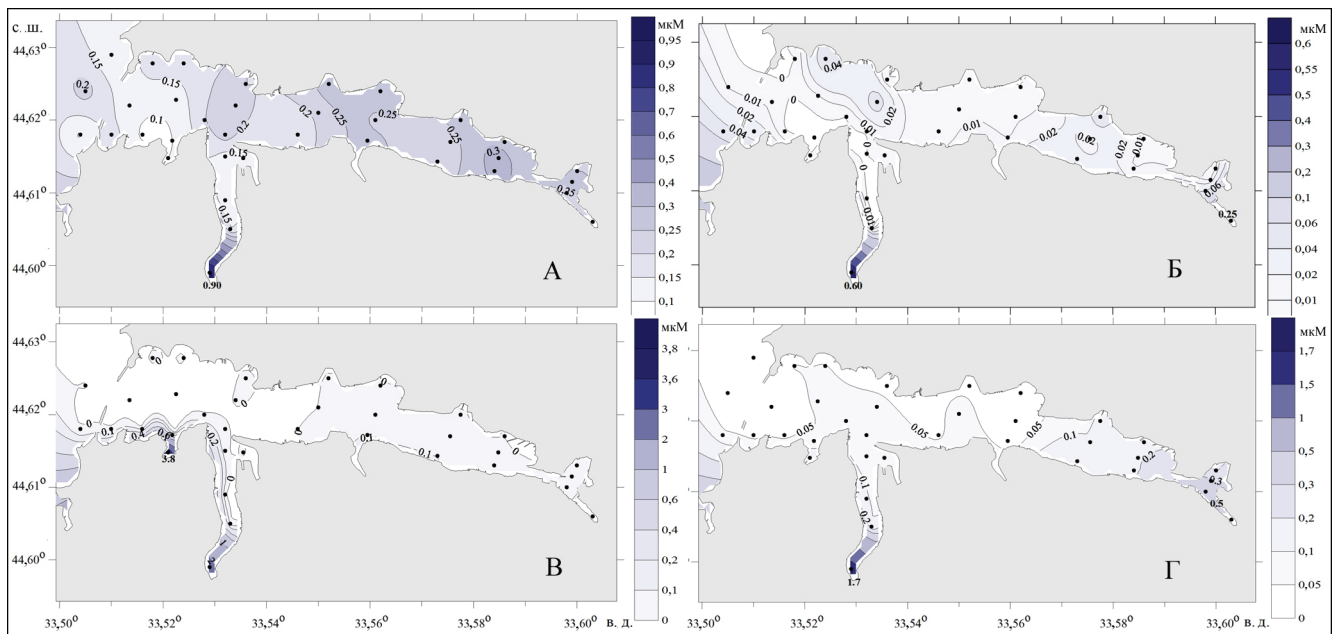


Рис. 3. Содержание фосфатов в поверхностных водах Севастопольской бухты в 2022 г.:

А – февраль; Б – апрель; В – сентябрь; Г – ноябрь

Fig. 3. Phosphate content in the surface waters of the Sevastopol Bay in 2022:

А – February; Б – April; В – September; Г – November

Тот же цикл накопления зимой, расходования весной, практического исчезновения в теплый период и постепенного увеличения содержания поздней осенью характерен и для нитратов (рис. 5).

В феврале их содержание на большей части акватории было в среднем около 10 мкМ, в апреле снижалось до 3–5 мкМ, достигая минимума в сентябре – 2–3 мкМ в центральной части бухты, и практически

нулевых концентраций (около 0,5 мкМ, при пределе обнаружения 0,36 мкМ) в районе выхода из бухты; к ноябрю наблюдалось постепенное возрастание концентраций (до 6 мкМ). Для нитратов их поступление со стоком реки Черной практически незаметно по сравнению с пресноводным источником, впадающим в кутовую часть Южной бухты. Там

содержание нитратов во все рассмотренные сезоны в 100 раз превышало фоновые (за выходом из бухты) и достигало 234–380 мкМ в различные сезоны. В устьевой части реки Черной концентрация нитратов зависела от сезона и изменялась, в среднем, от 7 до 50 мкМ с максимальными значениями в апреле, минимальными – в сентябре.

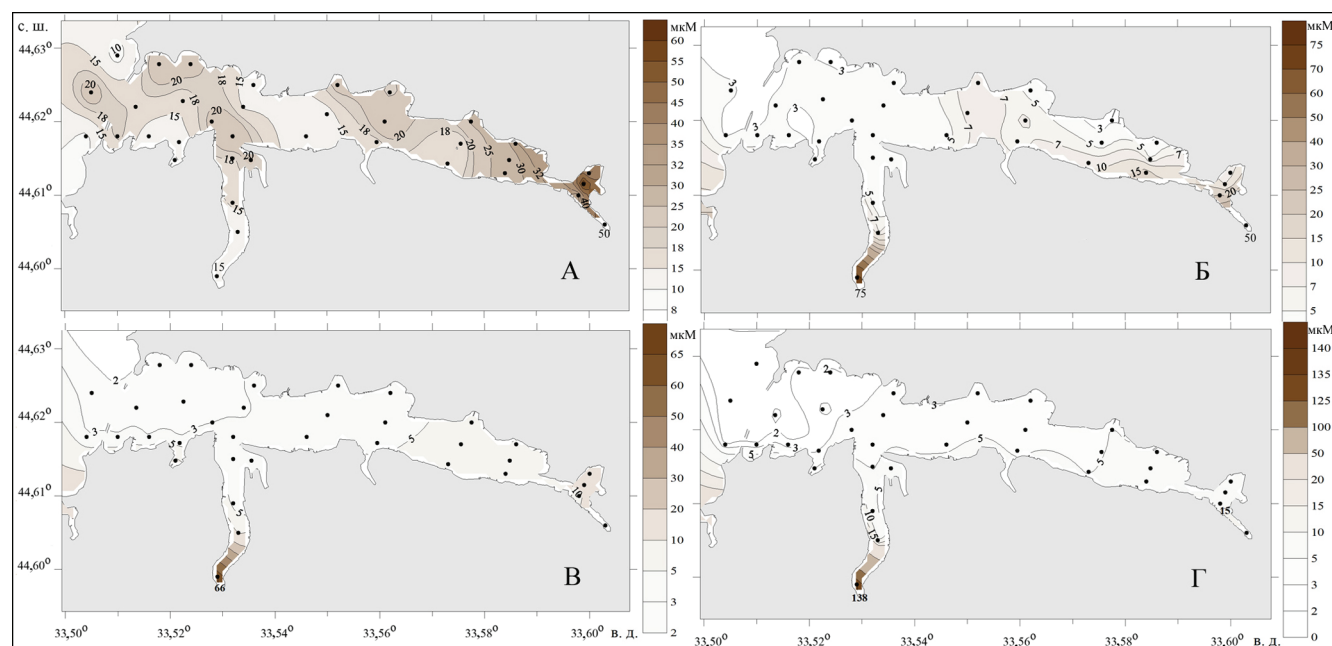


Рис. 4. Содержание кремниевой кислоты в поверхностных водах Севастопольской бухты в 2022 г.:
А – февраль; Б – апрель; В – сентябрь; Г – ноябрь

Fig. 4. Silica acid content in the surface waters of the Sevastopol Bay in 2022:
A – February; B – April; B – September; Г – November

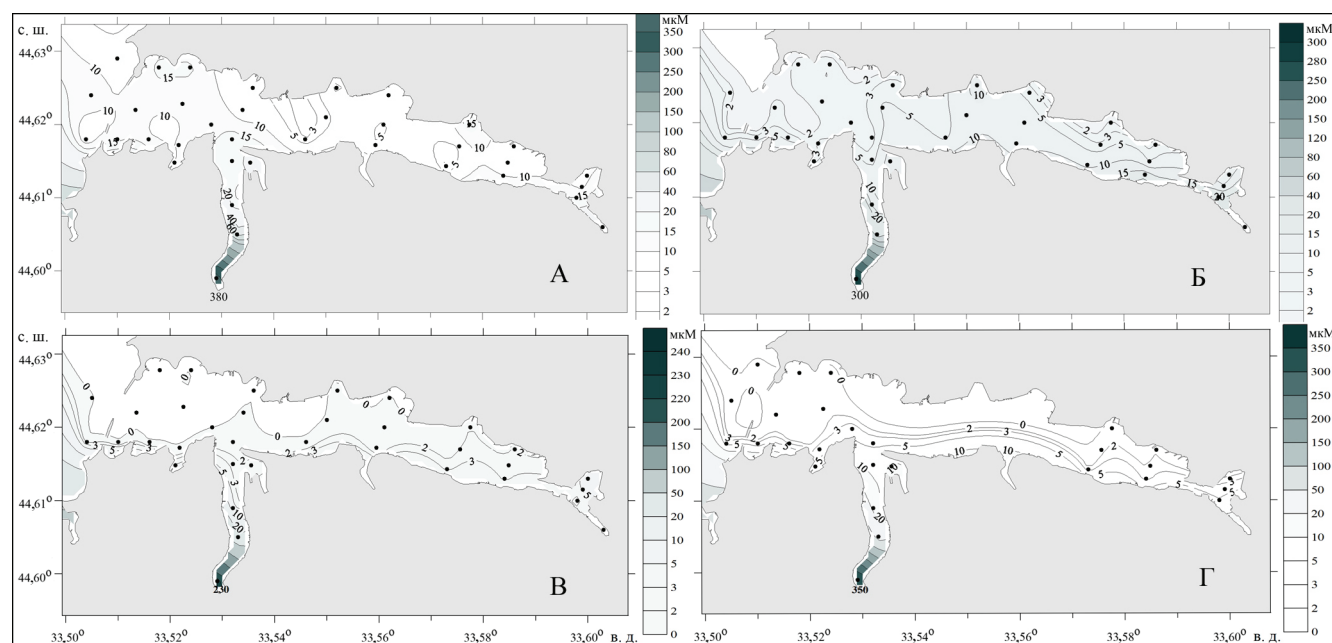


Рис. 5. Содержание нитратов в поверхностных водах Севастопольской бухты в 2022 г.:
А – февраль; Б – апрель; В – сентябрь; Г – ноябрь

Fig. 5. Nitrate content in the surface waters of the Sevastopol Bay in 2022:
A – February; Б – April; В – September; Г – November

Изменчивость концентрации ионов аммония в поверхностных водах Севастопольской бухты в наибольшей степени проявляется в зимний период, когда наблюдаются повышенные концентрации (в среднем 2,5–2,0 мкМ), и в теплый период (сентябрь), когда для большей части бухты отмечаются невысокие концентрации ионов аммония (около 0,9 мкМ) (рис. 6). Источником ионов аммония преимущественно является пресноводный сток бухты Южной, наблюдается та же закономерность, что и

в распределении нитратов – концентрации (за исключением зимнего периода) примерно в 20–40 раз превышают фоновые. В осенний период (сентябрь, ноябрь) кроме повышенных концентраций в кутовой части Южной бухты и приустьевом районе реки Черной, выделяется еще один район – Артбухты, где в сентябре был отмечен максимум концентрации 80 мкМ, а в ноябре она хоть и была несколько ниже (48 мкМ), но являлась максимальной для всей исследуемой акватории.

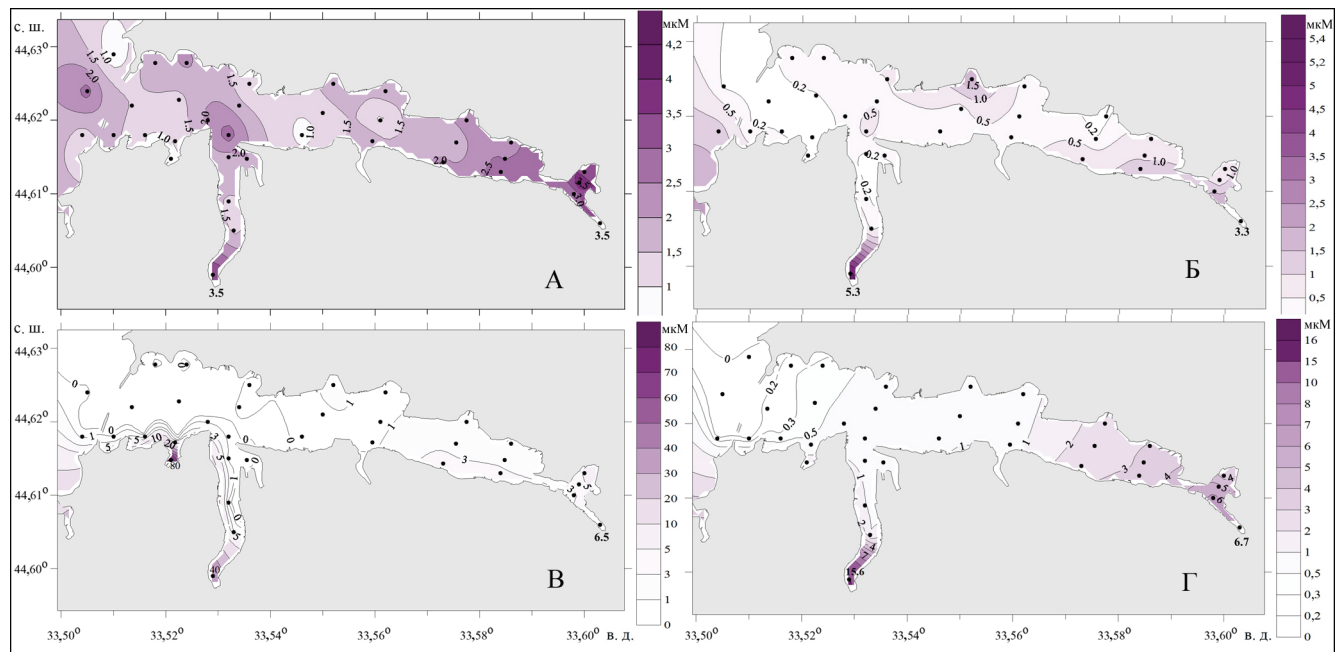


Рис. 6. Содержание аммония в поверхностных водах Севастопольской бухты в 2022 г.:

А – февраль; Б – апрель; В – сентябрь; Г – ноябрь

Fig. 6. Ammonium content in the surface waters of the Sevastopol Bay in 2022:

A – February; B – April; B – September; Г – November

По распределению биогенных элементов и их концентрациям в предустьевом районе реки Черной (до ст. 8 [Орехова и др., 2018]) в 2022 г. был оценен ее вклад в поступление биогенных элементов в акваторию бухты. С учетом среднесуточной величины расхода реки Черной – 56 млн м³/год [Орехова и др., 2018] поступление в 2022 г. минеральных форм азота (за исключением нитритов) составило 31 т/год, фосфатов – 4,6 т/год и кремниескислоты – 56 т/год. Эти величины сопоставимы с полученными ранее среднесуточными значениями [Орехова и др., 2018], но следует отметить увеличение поступления минеральных форм азота (ранее было 24,5 т/год). Таким образом, можно отметить увеличение вклада реки Черной в поступление неорганического азота в воды бухты.

Так как концентрация рассматриваемых биогенных элементов в устьевой части бухты Южной была

значительно выше фоновых, то необходимо оценить вклад и этого пресноводного стока. Однако нигде в литературных данных не встречается информация о величине стока данного источника, также в этих источниках он помечен как аварийный [Грузинов и др., 2019]. Тем не менее по нашим данным превышение концентрации всех биогенных элементов в поверхностном слое вод в данном районе по сравнению с остальной частью бухты наблюдается в течение всего года, что может указывать на постоянно действующий источник распресненных вод и загрязняющих веществ. К сожалению, количественно оценить поступление биогенных элементов с этим источником не представляется возможным.

Для доказательства поступления пресноводного стока в куттовую часть Южной бухты приводим рис. 7, на котором для двух сезонов представлено распределение в поверхностных водах солёности

и нитратов, содержание последних в Южной бухте постоянно превышает фоновые значения на два порядка. В апреле, когда следует ожидать максимального поступления пресных вод с выпавшими осадками, соленость в кутовой части не превышает 15‰. В сентябре объем пресного стока и распределение поверхностных вод гораздо меньше, тем не

менее соленость заметно повышается по мере удаления от кутовой части.

В качественном соответствии с объемом поступивших пресных вод находится концентрация в поверхностных водах нитратов. В апреле концентрация нитратов в кутовой части превышает 350 мкМ, в сентябре она несколько меньше, около 200 мкМ.

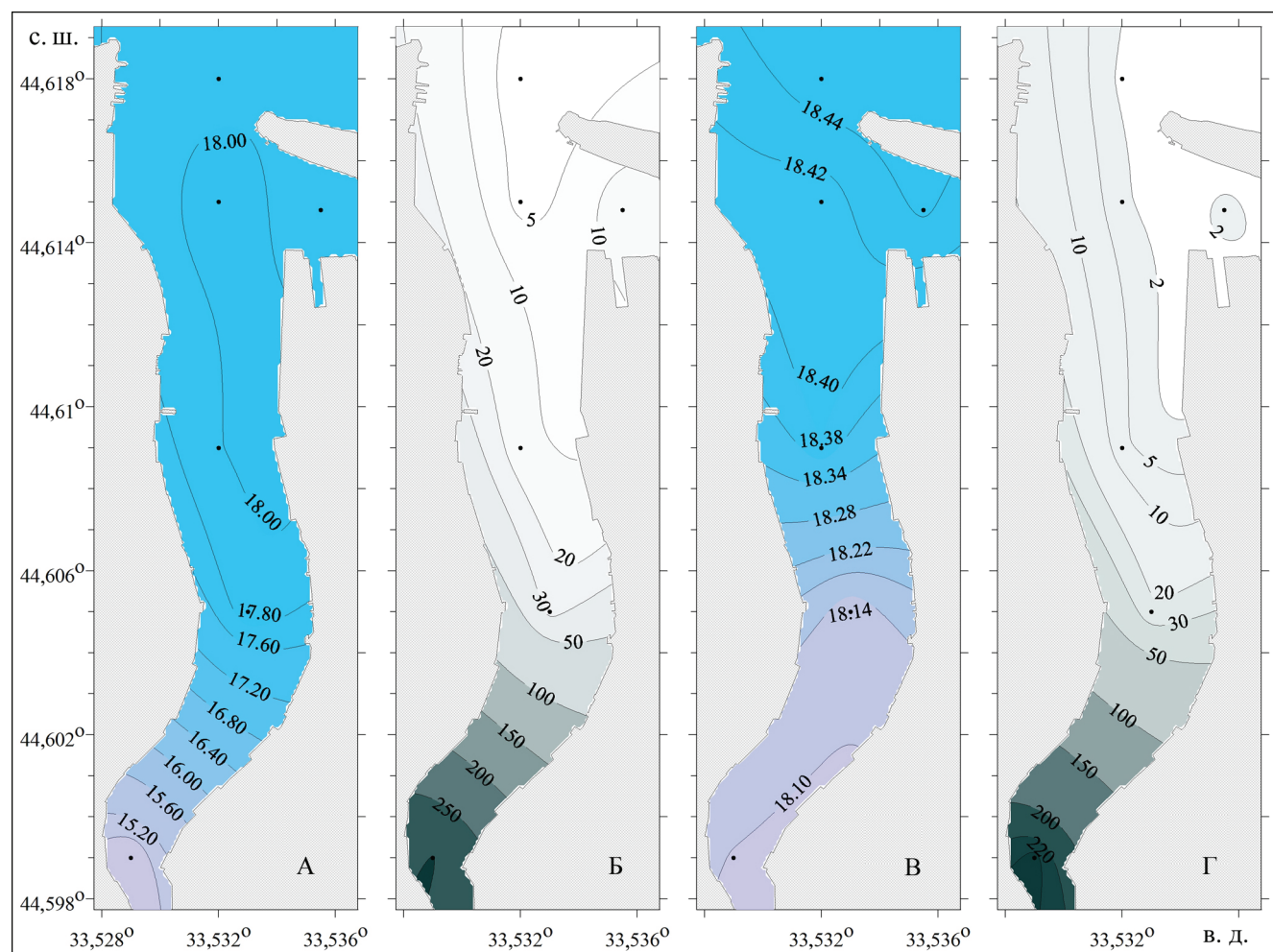


Рис. 7. Пространственное распределение солености (в ‰) (А, В) и нитратов (в мкМ) (Б, Г) в поверхностных водах Южной бухты в апреле (А, Б) и сентябре (В, Г) 2022 г.

Fig. 7. Spatial distribution of salinity (in ‰) (A, B) and nitrate (in μM) (Б, Г) in surface waters of the Yuzhnaya Bay in April (A, B) and September (B, Г) 2022

Еще одним индикатором экологического состояния морской среды является содержание кислорода как компонента, обеспечивающего нормальное функционирование морских экосистем и дыхание биологических организмов. Кроме того, наличие кислорода и его концентрация определяют окислительно-восстановительные условия системы, возможность развития анаксийных условий и появления сероводорода, являющегося каталитическим ядом.

Однако, если опасность экологическому состоянию вод, возникающая вследствие высокого содер-

жания биогенных элементов, следует искать в их поверхностных распределениях, которые обеспечивают временами 200% насыщение кислородом поверхностных вод [Иванов и др., 2006], то для выявления особенностей режима кислорода наиболее информативно его придонное распределение. Это обусловлено так же и тем, что донные отложения являются дополнительным источником органического вещества и биогенных элементов, что приводит к более интенсивному потреблению кислорода, а значит, и его меньшей концентрации в придонном слое вод.

Так, в период исследований в поверхностных водах бухты в зимний период концентрация кислорода приближалась к полному насыщению (в среднем 98% нас.), к весеннему периоду наблюдалось пересыщение вод кислородом (105% нас.), в осенний период наблюдалось снижение концентрации кислорода (93 и 90% нас. в сентябре и ноябре соответственно). Такое изменение концентрации кислорода соответствует осредненным данным многолетних исследований Севастопольской бухты [Свищев и др., 2011].

Концентрация кислорода в придонном слое вод, как и следовало ожидать, была ниже, чем в поверхностном (во все сезоны менее 86–97% нас.). В сезонном ходе изменения концентрации прослеживалась та же тенденция, что для поверхностного слоя, – максимум (97% нас.) в апреле, минимум в сентябре – ноябре. При этом минимум концентрации кислорода (44% нас.), близкой к состоянию гипоксии [Diaz, 2001; Zhang et al., 2010], был зафиксирован на ст. 8 в сентябре. Данная ситуация носит сезонный характер – ежегодно в теплый период года (август – сентябрь) в районе ст. 8 (см. рис. 1) наблюдается крайне низкая степень насыщения, часто менее 10%. В некоторые годы она падала до 0%, в этих случаях содержание сероводорода фиксировалось органолептически (по запаху).

В частности, в 2004 г. насыщение придонных вод в этом районе приближалось к 0%, в 2014 и 2015 гг. составляло 6 и 10% соответственно, в 2021 г. – около 15%, что соответствует состоянию аноксии / гипоксии. При этом в остальных районах бухты, включая ближайшие станции, насыщение придонных вод кислородом достигало 85–90%. Причины дефицита кислорода связаны с существованием искусственно созданной выемки под плавучим доком, расположенным возле ст. 8, и более подробно рассмотрены в [Кондратьев, Видничук, 2020]. Это углубление служит своеобразным «депо» для отмершего планктона, который ранее образовался в приустьевом районе реки Черной за счет дополнительного поступления биогенных элементов с речным стоком.

Таким образом, можно предположить, что сток реки Черной, обогащенный биогенными элементами, способствует продуцированию дополнительного количества органического вещества, его переносу и накоплению в искусственно созданном углублении под плавучим доком, что в совокупности приводит к развитию дефицита кислорода и гипоксических (содержание кислорода менее 30% нас.), а иногда

и аноксических (отсутствие кислорода) условий в придонных водах этого углубления. При негативном стечении обстоятельств – снижении динамики вод, увеличении температуры вод – есть опасность подъема этих вод на поверхность. Тогда экологии бухты (количеству и разнообразию фитопланктона, а далее по трофической цепи рыбным ресурсам и бентосу) будет нанесен непоправимый ущерб.

ВЫВОДЫ

На примере четырех сезонных съемок Севастопольской бухты в 2022 г. обсуждены основные экологические проблемы состояния ее вод.

Подтверждено основополагающее влияние на гидрохимический состав вод бухты стока реки Черной, который служит одним из основных источников биогенных элементов.

Отмечено значительное влияние пресноводного стока в кутовой части Южной бухты на гидрохимические характеристики данного района, а при ветрах южных румбов возможно распространение этих вод к центральной части бухты, что негативно отразится на состоянии ее экосистемы.

Поступление пресноводного стока в кутовую часть Южной бухты требует дополнительных работ по выявлению как основного источника, так и состава его вод.

В 2022 г. зафиксировано появление дополнительного источника ионов аммония в кутовой части Артиллерийской бухты, его концентрация в сентябре в 80 раз превышала фоновую. Так как аммоний является продуктом окисления органического вещества, то его появление может указывать на преобладание деструкционных процессов, что негативно отражается на условиях существования биологических организмов и экологическом состоянии вод в целом.

В искусственно созданном углублении под плавучим доком (ст. 8) в теплое время года регулярно фиксируется дефицит кислорода, а в некоторых случаях и образование сероводорода.

Таким образом, в настоящее время в Севастопольской бухте существует как минимум два постоянно действующих источника биогенных элементов и еще один носит сезонный характер. Созданное искусственное углубление в районе погружного дока может быть потенциальным источником сероводородного заражения. Все это негативно отражается на условиях существования биологических организмов, экологическом состоянии всей экосистемы и рекреационном потенциале бухты.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы госзадания FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багаев А.В., Никишин В.В., Рауэн Т.В., Вержевская Л.В., Щербаченко С.В. Локальные изменения физико-биологических параметров поверхностных вод Севастопольской бухты под влиянием ливневого стока // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38. № 2. С. 165–184. DOI: 10.22449/0233-7584-2022-2-165-184.
- Грузинов В.М., Дьяков Н.Н., Мезенцева И.В., Мальченко Ю.А., Жохова Н.В., Коршенин А.Н. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района // Океанология. 2019. Т. 59. № 4. С. 579–590. DOI: 10.31857/S0030-1574594579-590.
- Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н., Романов А.С., Игнатъева О.Г. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. Севастополь: МГИ НАНУ, 2006. 90 с.
- Кондратьев С.И., Видничук А.В. Особенности вертикального распределения кислорода и сероводорода в Черном море по экспедиционным данным Морского гидрофизического института в 1995–2015 годах // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 5. С. 422–433. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-5-422-433.
- Кондратьев С.И., Видничук А.В. Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 107–212. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-2-107-121.
- Методы гидрохимических исследований океана. М.: Наука, 1978. 271 с.
- Овсяный Е.И., Артеменко В.М., Романов А.С. и др. Сток реки Черной, как фактор формирования водно-солевого режима и экологического состояния Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 57–65.
- Орехова Н.А., Вареник А.В. Современный гидрохимический режим Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 2. С. 134–146. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-2-134-146.
- Орехова Н.А., Коновалов С.К., Медведев Е.В. Особенности регионального баланса неорганического углерода морских экосистем в условиях антропогенной нагрузки // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 3. С. 248–260. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-3-248-260.
- Орехова Н.А., Медведев Е.В., Овсяный Е.И. Влияние вод реки Черной на гидрохимический режим Севастопольской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 84–91. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-84-91.
- Рябцев Ю.Н., Вержевская Л.В., Рауэн Т.В., Цыганова М.В., Никишин В.В., Багаев А.В. Поиск оптимального расположения проектируемых выпусков городской канализации в Севастопольской бухте с помощью численного моделирования и геоинформационного анализа // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 111–128. DOI: 10.22449/2413-5577-2021-1-111-128.
- Свищев С.В., Кондратьев С.И., Коновалов С.К. Закономерности сезонных изменений содержания и распределения кислорода в водах Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 4. С. 64–78.
- Совга Е.Е., Мезенцева И.В., Хмара Т.В. Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценки самоочистительной способности ее экосистемы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15. № 2. С. 110–123. DOI: 10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt.
- Совга Е.Е., Хмара Т.В. Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 1. С. 31–40. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-1-31-40.
- Современные методы гидрохимических исследований океана / под ред. О.К. Бордовского, А.М. Черняковой. М.: ИО АН СССР, 1992. 201 с.
- Diaz R.J. Overview of hypoxia around the World, *J. Environ. Qual.*, 2001, vol. 30, p. 275–281.
- Zhang J., Gilbert D., Gooday A.J. et al. Natural and human hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development, *Biogeosciences*, 2010, vol. 7, p. 1443–1467.

Поступила в редакцию 27.04.2023

После доработки 15.06.2023

Принята к публикации 27.07.2023

POTENTIAL THREATS TO THE ECOLOGICAL STATE OF WATER IN THE SEVASTOPOL BAY

S.I. Kondratev¹, N.A. Orekhova²

^{1,2} Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of RAS" (Sevastopol), Department of Marine Biogeochemistry

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Chemistry; e-mail: skondratt@mail.ru

² Head of the Laboratory for Monitoring and Research of Greenhouse Gases and Oxygen in the Marine Environment, Ph.D. in Geography; e-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru

The purpose of the work is to discuss the main environmental problems of the state of waters in the Sevastopol Bay and to identify the causes affecting their quality. Four seasonal surveys of the Sevastopol Bay water area in 2022 confirmed the prime impact of the Black River runoff, a main source of nutrients, on the hydrochemical composition of the bay waters.

At the same time, it is noted that the hydrochemical parameters of the South Bay waters are predominantly affected by freshwater runoff in the estuarine part of the area rather than by the Black River water. It is assumed that the runoff is permanent, and not emergency, as previously thought. With the winds of the southern directions, the spread of the South Bay water to the central part of the Sevastopol Bay is possible, thus affecting the state of its ecosystem.

In summer an additional source of ammonium ions was recorded in the estuarine part of the Artillery Bay, next to which the Crystal city beach is located, with concentrations 80 times higher than the background. Since ammonium is a product of organic matter oxidation, its appearance may indicate the predominance of destructive processes, which affect living conditions of biological organisms and, in general, the ecological state of waters.

In the warm season a constant deficiency of oxygen was observed in the bottom waters of an artificial depression under the floating dock, which in some cases leads to the formation of hydrogen sulfide.

All detected threats affect the ecological state of entire ecosystem of the bay, the living conditions of biological organisms and the recreational potential of the bay.

Keywords: hydrochemical composition of water, ecology, hydrogen sulfide contamination, field data

Acknowledgments. The work was carried out under the state task theme FNNN-2021-0005 "Complex interdisciplinary studies of oceanologic processes which determine functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black Sea and the Sea of Azov".

REFERENCES

- Bagaev A.V., Nikishin V.V., Rauen T.V., Verzhevskaja L.V., Scherbachenko S.V. Local changes of physical and biological parameters of the Sevastopol Bay surface waters under the influence of rain drainage, *Physical Oceanography*, 2022, vol. 29, no. 2, p. 152–171.
- Diaz R.J. Overview of hypoxia around the World, *J. Environ. Qual.*, 2001, vol. 30, p. 275–281.
- Gruzinov V.M., Dyakov N.N., Mezenceva I.V., Malchenko Y.A., Zhohova N.V., Korshenko A.N. Sources of coastal water pollution near Sevastopol, *Okeanology*, 2019, vol. 59, no. 4, p. 523–532.
- Ivanov V.A. i dr. *Gidrologo-gidrohimičeskij režim Sevastopol'skoj buhty i ego izmenenija pod vozdejstviem klimatičeskikh i antropogennyh faktorov* [Hydrological and hydrochemical regime of the Sevastopol Bay and its changes under the influence of climatic and anthropogenic factors], Preprint, NAN Ukrainy, MGI, Sevastopol, 2006, 90 p. (In Russian)
- Kondratev S.I., Vidnichuk A.V. Lokal'naja sezonnaja gipoksija i obrazovanie serovodoroda v pridonnyh vodah Sevastopol'skoj buhty v 2009–2019 godah [Local seasonal hypoxia and hydrogen sulfide formation in the bottom waters of the Sevastopol Bay in 2009–2019], *Ekologičeskaja bezopasnost' pribrežnoj i shel'fovoj zon morja*, 2020, no. 2, p. 107–212, doi:10.22449/2413-5577-2020-2-107-121. (In Russian)
- Kondratev S.I., Vidnichuk A.V. Features of the oxygen and sulfide vertical distribution in the Black Sea based on the expedition data obtained by Marine Hydrophysical Institute in 1995–2015, *Physical Oceanography*, 2018, vol. 25, no. 5, p. 390–400.
- Metody gidrokhimičeskikh issledovanij okeana* [Methods of hydrochemical research of the Ocean], O.K. Bordovsky (ed.), Moscow, Nauka Publ., 1978, 271 p. (In Russian)
- Orekhova N.A., Konovalov S.K., Medvedev E.V. Features of inorganic carbon regional balance in marine ecosystems under anthropogenic pressure, *Physical Oceanography*, 2019, vol. 26, no. 3, p. 225–235.
- Orekhova N.A., Varenik A.V. Current hydrochemical regime of the Sevastopol Bay, *Physical Oceanography*, 2018, vol. 25, no. 2, p. 124–135.
- Orekhova N.A., Medvedev E.V., Ovsyany E.I. Vlijanie vod reki Chernoj na gidrohimičeskij režim Sevastopol'skoj buhty (Chernoe more) [Influence of the River Chernaya water on hydrochemical regime of the Sevastopol Bay (the Black Sea)], *Ekologičeskaja bezopasnost' pribrežnoj i shel'fovoj zon morja*, 2018, no. 3, p. 84–91, DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-84-91. (In Russian)
- Ovsyanyj E.I., Artemenko V.M., Romanov A.S. i dr. Stok reki Chernoj, kak faktor formirovanija vodno-solevogo režima i ekologičeskogo sostojanija Sevastopol'skoj buhty [Runoff of the Chernaya River as a factor of for-

- mation of the water-salt regime and the ecological state of the Sevastopol Bay], *Ekologicheskaja bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2007, no. 15, p. 57–65. (In Russian)
- Ryabtsev Ju.N., Verzhetskaja L.V., Rauen T.V., Tsyganova M.V., Nikishin V.V., Bagaev A.V. Poisk optimal'nogo raspolozhenija proektiruemyh vypuskov gorodskoj kanalizacii v Sevastopol'skoj buhte s pomoshh'ju chislennogo modelirovanija i geoinformacionnogo analiza [Search for the optimal configuration of projected municipal sewerage outfalls in the Sevastopol Bay using computational modeling and geoinformation analysis], *Ekologicheskaja bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon morja*, 2021, no. 1, p. 111–128, DOI:10.22449/2413-5577-2021-1-111-1284. (In Russian)
- Sovga E.E., Khmara T.V. Influence of the Chernaya River runoff during high and low water on the ecological state of the apex of the Sevastopol Bay water area, *Physical Oceanography*, 2020, vol. 27, no. 1, p. 28–36.
- Sovga E.E., Mezentseva I.V., Khmara T.V. Modelirovanie sezonnoj izmenchivosti gidrodinamicheskogo rezhima Sevastopol'skoj buhty i ocenki samoochistitel'noj sposobnosti ee ekosistemy [Simulation of seasonal hydrodynamic regime in the Sevastopol Bay and of assessment of the self-purification capacity of its ecosystem], *Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika*, 2022, vol. 15, no. 2, p. 110–123, DOI: 10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt. (In Russian)
- Sovremennye metody gidrohimicheskikh issledovanij okeana* [Modern methods of hydrochemical studies of the ocean], O.K. Bordovsky, A.M. Chernyakova (eds.), Moscow, Shirshov Institute of Oceanology of the USSR Academy of Sciences Publ., 1992, 201 p. (In Russian)
- Svishchev S.V., Kondrat'ev S.I., Konovalov S.K. Regularities of seasonal variations in the content and distribution of oxygen in waters of the Sevastopol Bay, *Physical Oceanography*, 2011, no. 4, p. 280–293.
- Zhang J., Gilbert D., Gooday A.J., et al. Natural and human hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development, *Biogeosciences*, 2010, vol. 7, p. 1443–1467.

Received 27.04.2023

Revised 15.06.2023

Accepted 27.07.2023