

Экологическое состояние юго-восточной части залива Сиваш (Азовское море) в условиях изменения солености

О. В. СОЛОВЬЕВА¹, Е. А. ТИХОНОВА¹, С. В. АЛЕМОВ¹, Н. В. БУРДИЯН¹, Т. В. ВИТЕР¹,
Е. В. ГУСЕВА¹, Е. А. КОТЕЛЬЯНЕЦ², Т. А. БОГДАНОВА¹

¹ *Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН
299011, Севастополь, просп. Нахимова, 2
E-mail: tihonova@mail.ru*

² *Морской гидрографический институт РАН
299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2*

Статья поступила 23.03.2018

После доработки 01.08.2018

Принята к печати 09.08.2018

АННОТАЦИЯ

Дана оценка современного экологического состояния залива Сиваш (южная часть Восточного Сиваша) в условиях изменения его водного режима. Судя по полученным концентрациям основных классов загрязняющих веществ, преобладающим видом антропогенного воздействия на состояние экосистемы исследуемой акватории, является сокращение стока пресных вод, вызвавшее рост солености воды. Количественные показатели микробного сообщества донных отложений залива характеризуют их загрязнение органическими веществами. Рост солености в водоеме вызвал перестройку основных компонентов донного сообщества, таких как мейо- и макрозообентос, выражающуюся в снижении показателей биоразнообразия и изменении таксономической структуры биоценоза.

Ключевые слова: залив Сиваш, физико-химические показатели, биогеоценоз, макрозообентос, мейобентос, бактерии, тяжелые металлы.

Залив Сиваш, представляющий собой систему многочисленных мелких заливов и лагун [Бурксер, 1928], расположен в северо-восточной части Крымского полуострова. От Азовского моря он отделен длинной косой Арабатская Стрелка, соединяется с морем Геническим проливом и проливом Промойна. На протяжении последнего столетия залив

интенсивно используется в хозяйственных целях и, как следствие, подвергается существенным антропогенным преобразованиям. В частности, две искусственные дамбы поделили залив на три района: Восточный, Центральный и Западный Сиваш. Разнообразие экологических характеристик данных районов обусловлено сгонно-нагонными процесса-

ми, различиями в годовой сетке искусственных водотоков территории Присивашья и антропогенной деятельностью [Совга, Щурова, 2013]. После ввода в эксплуатацию Северо-Крымского канала (СКК) произошло значительное распреснение гиперсоленого водоема. Так, показатели солености в южной части зал. Сиваш ранее составляли 139–156 ‰ [Совга, Щурова, 2013], а в период функционирования канала соленость в этом регионе снизилась до 22–26 ‰ [Болтачев и др., 2011]. В это же время одной из причин загрязнения акватории оказалась сельскохозяйственная деятельность, в частности, стоки с рисовых чеков и рыбоводческих хозяйств, служившие источником поступления пестицидов и минеральных удобрений. Перекрытие СКК в 2014 г. привело к резкому сокращению поступления пресной воды в Сиваш. Как следствие, соленость воды в заливе стала резко возрастать [Шадрин и др., 2016], что привело к трансформации всех характеристик экосистемы залива. В первую очередь опреснение или осолонение изменяет видовой состав гидробионтов [Плотников, 2013]. В последние годы проблемы осолонения, изменения уровня воды и трансформации сообщества Сиваша привлекли внимание ученых различного профиля [Шадрин и др., 2016; Щурова и др., 2016]. В период 2013–2015 гг. проведен ряд гидробиологических экспедиционных исследований, позволивших оценить планктонное и бентосное сообщество залива в условиях роста солености [Шадрин и др., 2016]. Однако исследования залива в большей степени проводились в его центральных и западных частях, тогда как самая мелководная южная часть Восточного Сиваша обследовалась эпизодически, а после перекрытия СКК и вследствие наличия пограничной зоны, данные о ней ограничиваются 2015 г. [Шадрин и др., 2016].

Как известно, физико-химические свойства донных отложений являются одними из наиболее информативных показателей состояния водных экосистем и изменений в них, происходящих вследствие влияния природных и антропогенных факторов [Осмелкин и др., 2015]. Антропогенное эвтрофирование водоемов приводит к изменению таких параметров донных осадков, как пористость и гигроскопическая влажность. В этом случае в

отложениях начинают преобладать процессы десорбции ранее накопленных веществ, в том числе токсичных [Венедиктова и др., 2017]. Состав, количество и доступность органического вещества не только определяют пищевые ресурсы донных осадков, но и позволяют анализировать процессы сорбции и десорбции с участием металлов [Венедиктова и др., 2017]. Известно, что для высокодисперсных отложений свойственно не только повышенное количество органического вещества, но и концентрирование микроэлементов, таких как марганец и железо. Однако механизмы накопления данных элементов донными осадками интерпретируются неоднозначно [Романов и др., 2007].

В свою очередь, совокупность физико-химических и биологических процессов в донных отложениях обуславливает интенсивность самоочищения экосистемы. Проведенное исследование было сосредоточено на состоянии донного биогеоценоза в условиях изменения параметров окружающей среды. Данный компонент экосистемы является хорошим индикаторным инструментом для оценки хронических процессов, протекающих в водоеме. Помимо основных физико-химических показателей, также исследовались бактерио-, мейо- и макрзообентос. Данные объекты довольно чувствительны к изменению физико-химических условий и несут индикаторную функцию [Semprucci et al., 2015; Zeppelini et al., 2015], позволяющую по состоянию объектов судить о благополучии экосистемы в целом. Таким образом, определение отдельных параметров современного состояния экосистемы является важным этапом исследования процесса трансформации биоценоза в связи с антропогенной деятельностью.

Цель настоящей работы – изучение современного экологического состояния южной части Восточного Сиваша в условиях изменения водного режима залива, связанного с увеличением солености его вод. Для ее достижения ставились следующие задачи: оценка физико-химических показателей донных отложений; исследование содержания основных классов загрязняющих веществ, в частности, хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ), нефтяных углеводородов (НУ), тяжелых металлов (ТМ); определение количественных характеристик гетеротрофных бак-

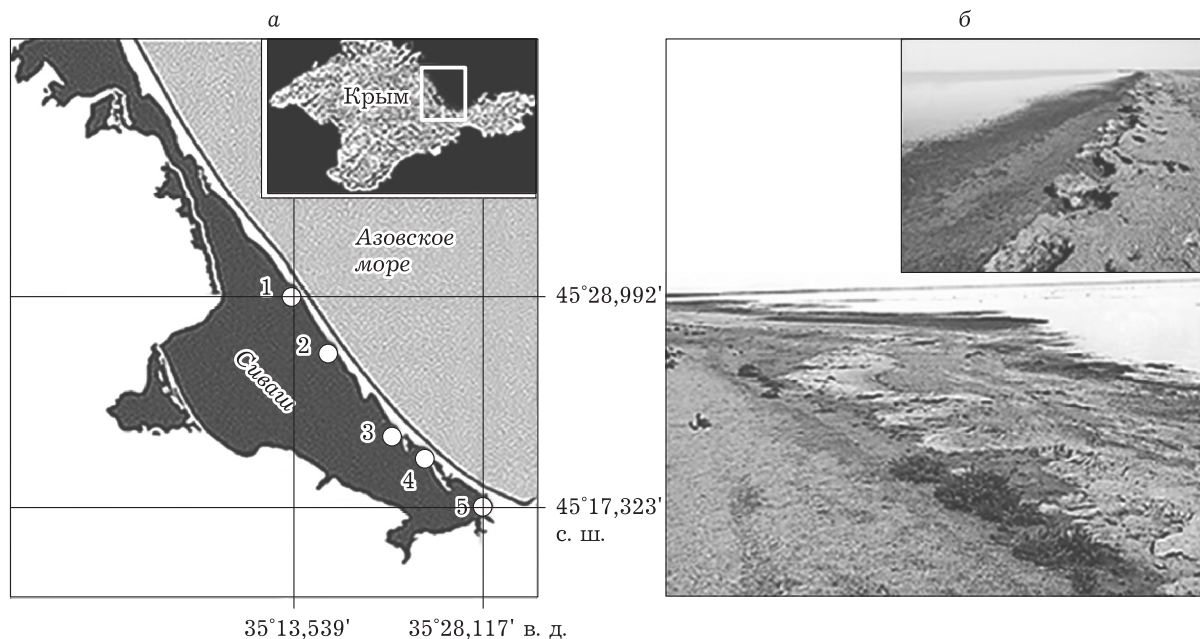


Рис. 1. Схема станций (а) и фотографии отступившего уреза воды (б) в районе юго-восточной части залива Сиваш, 2017 г.

терий – основных деструкторов органического вещества автохтонного и аллохтонного происхождения; установление численности сульфатредуцирующих бактерий – основных производителей сероводорода и тионовых бактерий – активных окислителей последнего; изучение состава мейо- и макрозообентоса. Полигоном для исследований выбраны юго-восточные участки залива, примыкающие к косе Арабатская стрелка (рис. 1).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Пробы донных отложений залива Сиваш со стороны Арабатской стрелки отбирали ручным пробоотборником по сетке станций (см. рис. 1) во время экспедиционных исследований прибрежной полосы Восточного Крыма в 2013, 2016 и 2017 гг. Глубина на точках отбора не превышала 1,0 м. В свежееотобранных пробах донных отложений *in situ* проводили измерение величин pH и Eh pH-метром-термометром “Нейтрон-pH”.

В лабораторных условиях осадки высушивали до воздушно-сухого состояния, растирали в ступе и часть пробы просеивали через сита с диаметром ячеек 0,25 мм для определения концентраций НУ и ХЭВ. В подготовленных таким образом пробах определя-

ли общее количество ХЭВ – весовым методом, НУ – методом инфракрасной спектроскопии на спектрофотометре ФСМ-1201 [Руководство..., 1977], валовое содержание металлов As, Cr, Co, Ni, Pb, Zn, V, Sr и оксидов металлов TiO₂, MnO, Fe₂O₃ методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) с применением спектрометра “Спектроскан Макс-G” [Методика..., 2002]. Результаты для концентраций ХЭВ и НУ пересчитывали на 100 г воздушно-сухого донного осадка (возд.-сух. д. о.).

Построение градуировочных характеристик для ТМ проводили с использованием аттестованных образцов состава почвы: чернозема типичного (комплект СЧТ), дерново-подзолистой супесчаной почвы (комплект СДПС), красноземной почвы (комплект СКР), а также почвы серозема карбонатного (комплект ССК). Для проверки правильности построения градуировочных характеристик использовали контрольные образцы [Методика..., 2002] – государственные стандартные образцы ДСЗУ 163.1-98 и ДСЗУ 163.2-98.

В настоящее время не существует ПДК для содержания ТМ в морских донных отложениях. Поэтому концентрации микроэлементов в донных осадках обычно сравниваются либо с их кларками, либо с фоновыми зна-

чениями для изучаемых морских систем [Митропольский и др., 1982; Методика..., 2002].

Соленость воды определялась аргентометрическим методом.

Материалом для микробиологического анализа послужили пробы донных отложений, отобранные вручную с глубин 0,5–1,5 м на станциях 1, 3, 5 в августе 2016 г. и июне 2017 г. Численность бактерий в пробе определяли методом предельных разведений с использованием элективных сред [Практикум..., 2005; Бурдиян, 2011] с учетом солености воды. Концентрацию солености для микробиологических сред рассчитывали, ориентируясь на данные [Болтачев и др., 2011; Сергеева и др., 2014], полученные в 2008–2011 гг. Показатели солености для данного участка акватории в указанные годы колебались от 35 до 39 ‰ (микробиологические среды готовили с учетом нижнего показателя солености – 35 ‰). Последующую обработку материала проводили по ранее описанным методикам [Практикум..., 2005].

Мейобентосные пробы отбирали в июне 2017 г. на ст. 1–3, 5. Полученный материал промывали через сито с диаметром ячеек 1 мм для удаления организмов макробентоса. Фильтрат отмучивали на мельничном газе № 76 и фиксировали этанолом. Пробы микроскопировали с использованием камеры Богорова для определения основных таксономических групп мейобентоса с подсчетом численности каждой. Полученные результаты пересчитывали на 1 м².

Сбор материала для анализа макрозообентоса осуществляли в марте 2013 г. (станции 1–5), августе 2016 г. (ст. 3–5) и июне 2017 г. (ст. 1–5) ручным водолазным дночерпателем с площадью захвата 0,08 м². Отобранные пробы промывали на сите с диаметром ячеек 1 мм и фиксировали 96%-м раствором этанола. В лабораторных условиях определяли видовой состав, численность и биомассу, трофическую структуру макрозообентоса, для чего использовали модифицированную формулу Шеннона [Wilm, 1968]. Также рассчитывали индексы выравненности Пиелю [Pielou, 1966], которые показывают относительное распределение особей среди видов, отношение наблюдаемого разнообразия к максимальному.

Соленость воды в районе исследований в июне 2017 г. колебалась в пределах от 66 до 80 ‰, что в 5–6 раз превышает показатели, отмеченные до перекрытия СКК. Вода в период исследования прогревалась на различных станциях от 26 до 31 °С. Наибольшая температура зафиксирована на станции с максимальной соленостью. Прослеживалась связь солености и температуры воды (коэффициент корреляции составлял 0,99), отмеченная ранее в других гипергалинных водоемах Крыма и Индии [Evaporation..., 1997; Шадрин, 2012a].

Донные отложения в районе исследования представлены серыми илами с примесью песка и ракушки. За исключением одной пробы (ст. 1) осадок имел запах сероводорода и гниющей органики. Водородный показатель донных отложений в заливе колебался от 7,4 (ст. 4) до 8 (ст. 1), Eh находился в пределах от –62 до –129 мВ, что в целом характерно для указанного типа морских грунтов. Самые минимальные значения данного показателя отмечены на ст. 5, где глубина составляла 10–15 см. Следует отметить, что слабо-восстановительные условия не являются характерными для участков водоема с глубинами около полуметра, что обеспечивает хорошую аэрацию. Поэтому можно предположить, что, хотя Eh и не достигает величин, характерных для донных осадков с восстановительными характеристиками, но свидетельствует об активном разложении органического вещества и создании условий для развития анаэробной микробиоты.

По полученным данным содержание ХЭВ в донных отложениях залива колеблется в пределах от 40 до 150 мг · 100 г⁻¹ возд.-сух. д. о., что соответствует I–II уровням загрязнения [Мионов и др., 1986], установленным в 2013 и 2016 гг. При этом содержание НУ в донных отложениях колебалось от 15,2 до 24,3 м · 100 г⁻¹. Доля НУ от ХЭВ составляла соответственно от 10 (ст. 4) до 59 % (ст. 3). На ст. 3 больше половины ХЭВ являлись нефтяными углеводородами различного происхождения.

Содержание большинства ТМ в донных отложениях юго-восточной части Сиваша оказалось существенно ниже кларков данных элементов (табл. 1). Исключение составили хром, содержание которого близко к сред-

Содержание ТМ в донных отложениях юго-западной части залива Сиваш

Наименование	Уровень концентрации в заливе Сиваш			Концентрация в осадках азово-черноморского шельфа [Митропольский, 1982]
	минимум	максимум	среднее	
Zn, мг · кг ⁻¹	НПО*	НПО	НПО	48
Pb, мг · кг ⁻¹	13	32	23	85
Cu, мг · кг ⁻¹	НПО	10	3	47
Ni, мг · кг ⁻¹	НПО	15	8	42
Co, мг · кг ⁻¹	НПО	2	1	14
Cr, мг · кг ⁻¹	38	47	44	45–90
V, мг · кг ⁻¹	НПО	НПО	НПО	90
As, мг · кг ⁻¹	НПО	15	4	5**
Sr, мг · кг ⁻¹	416	1135	715	300**
TiO ₂ , %	0,14	0,20	0,16	0,6–0,8
Fe ₂ O ₃ , %	0,36	0,67	0,48	5,08
MnO, %	0,01	0,03	0,02	0,38

*НПО – ниже предела обнаружения метода РФА.

**Данные о концентрациях по Б. В. Виноградову [Добровольский, 2003].

ним показателям для осадков азово-черноморского бассейна, и стронций, концентрация которого вдвое превышала кларк данного элемента. Невысокие содержания ТМ в донных отложениях описаны и для других соленых озер Крыма [Жугайло и др., 2017]. Таким образом, можно говорить об отсутствии загрязнения ТМ данного региона.

Одной из задач настоящего санитарно-биологического исследования являлось определение количественного состава отдельных физиологических групп бактерий в донных отложениях исследуемой акватории.

Результаты исследований показали (рис. 2), что бактерии отдельных физиологических групп в донных отложениях юго-восточной

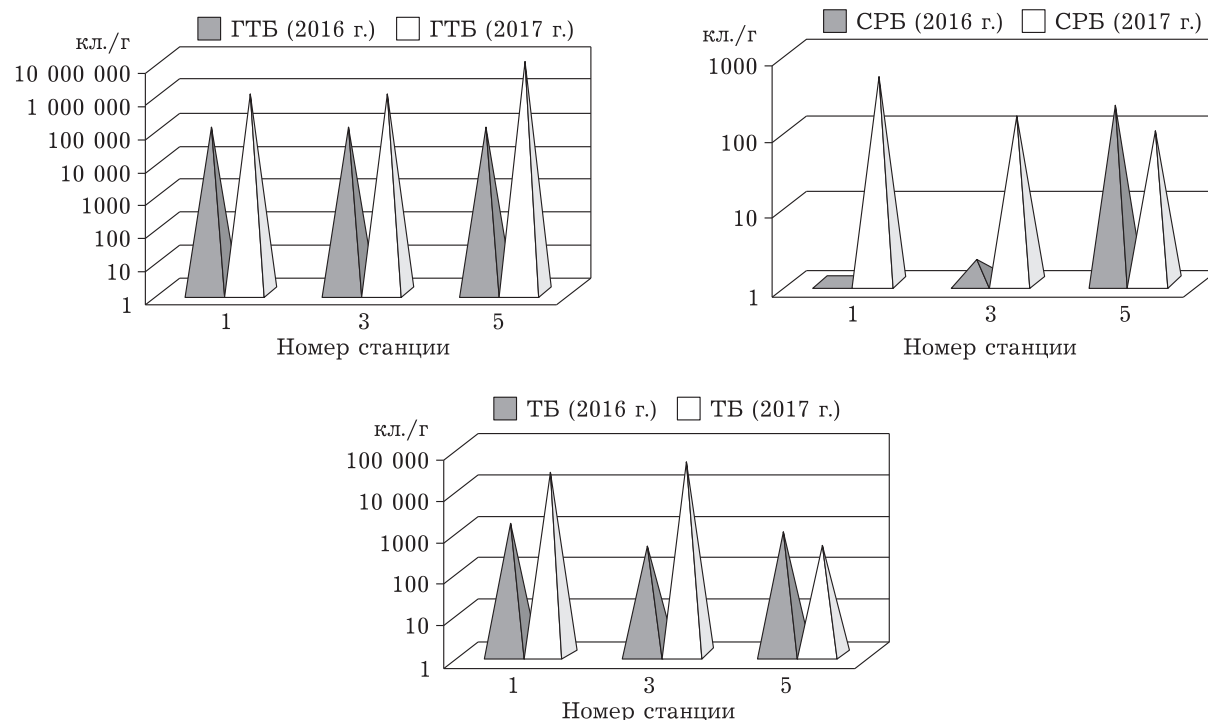


Рис. 2. Численность (к.л. · г⁻¹) гетеротрофных (ГТВ), сульфатредуцирующих (СРБ), тионовых (ТБ), групп бактерий в донных отложениях юго-восточной части залива Сиваш в 2016 и 2017 гг.

части залива Сиваш выделены из всех проб. Численность гетеротрофных бактерий (ГБ) варьировала в пределах 10^6 – 10^7 кл. · г⁻¹. Количественные показатели сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) колебались от 95 до $4,5 \cdot 10^2$ кл. · г⁻¹ соответственно, тионовых бактерий (ТБ) – от $4,5 \cdot 10^3$ до $4,5 \cdot 10^4$ кл. · г⁻¹.

При сравнении данных 2016 и 2017 гг. отмечено увеличение численности исследуемых групп бактерий во всех случаях, кроме тионовых бактерий на ст. 5. Увеличение на один-два порядка числа гетеротрофных бактерий по сравнению с 2016 г., по всей видимости, связано с интенсивной гибелью биоты в водоеме, одной из причин которой, скорее всего, является рост солености воды в заливе. Увеличение в несколько раз (по сравнению с результатами 2016 г.) численности анаэробных групп бактерий указывает на интенсификацию анаэробных процессов в донных отложениях, что также свидетельствует о возросшем количестве отмершей органики. Отмечено, что в исследуемых пробах показатели численности ТБ преобладали над СРБ, что говорит о наличии бактериального (тионового) фильтра, препятствующего проникновению сероводорода в близлежащие слои воды и грунта.

Поскольку данных о бактериальных характеристиках донных осадков залива Сиваш не обнаружено за всю историю его исследований, проведено сравнение полученных показателей с аналогичными в районах с повышенной антропогенной нагрузкой и загрязнением органическими веществами. Так, в иловых отложениях гиперсоленых озер Крыма, средняя численность СРБ бактерий составляла 10^5 кл. · г⁻¹ [Соколова, 2004], число ТБ, определенное для прибрежной зоны акватории Севастополя изменяется обычно в пределах $0,2$ – $4,5 \cdot 10^4$ кл. · г⁻¹ [Бурдиян, 2004], что соответствует пробам, отобраным в заливе Сиваш.

Для дальнейшей оценки экологического состояния исследуемой акватории необходимо продолжение микробиологических исследований и пополнение как сезонной, так и многолетней базы данных.

Наиболее полные исследования бентоса залива Сиваш до открытия Северо-Крымского канала представлены двумя комплекс-

ными работами – середины 1930-х гг. [Воробьев, 1940] и середины 1950-х гг. [Виноградова, Виноградов, 1960]. После введения в эксплуатацию СКК подобные работы не проводились [Довгаль, 2005], и процесс многолетнего изменения донной фауны в связи с опреснением залива остался не изученным. В начале XXI в. начался новый этап в изучении бентоса Сиваша [Сергеева и др., 2014; Витер, Алемов, 2015; Шадрин и др., 2016].

Одним из важнейших компонентов сообщества водоема является его мейобентосная составляющая, особенно его постоянная часть – эвмейобентос, который представляет собой чувствительный экологический индикатор процессов трансформации биотопа вследствие ряда специфических черт, как-то: короткий, по сравнению с макрозообентосными формами, жизненный цикл; высокая плотность поселений; практическое отсутствие планктонных личинок [Мокиевский, 2012]. В целом это дает следующие преимущества для анализа антропогенного воздействия – быструю реакцию на фактор (уменьшение численности, обеднение таксономического состава), точное определение места воздействия фактора (уменьшение и раздробление ареала – из-за отсутствия расселительных стадий) и скорость восстановления/смены состава эвмейобентоса после прекращения воздействия фактора.

Численность мейобентоса отмечена в пределах от 160 до 350 тыс. экз. · м⁻² (рис. 3, а), что в целом ниже показателей 2013 и 2015 гг. [Сергеева и др., 2014; Шадрин и др., 2016]. Представлены шесть крупных таксономических групп мейобентосных животных (от трех до пяти на разных станциях, против 3–11 по данным 2013–2015 гг.) со значительным доминированием крупных остракод, – везде их доля по численности значительно превышала половину, в отличие от данных предыдущих лет, где отмечалось доминирование нематод и копепод. Более того, на ст. 1–3 обнаружено практически полное отсутствие в пробах нематод, кроме самой распресненной станции (ст. 5 – 18,3 % от общей численности), – обычно основного компонента эвмейобентоса. Копеподы встречались чаще – на 75 % станций, но их численность не превышала 4 % от общей. Из представителей

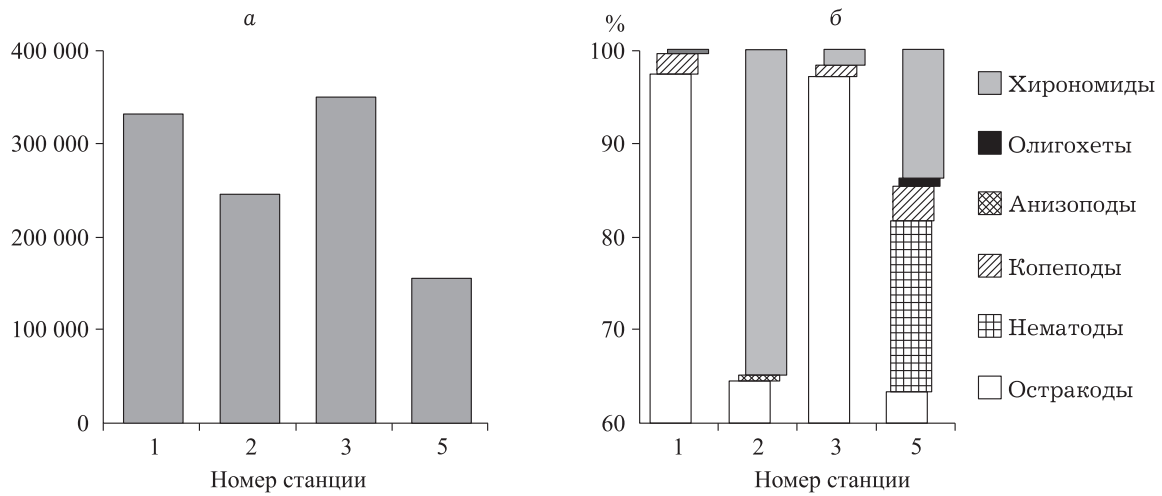


Рис. 3. Численность (а) и таксономическая структура (б) мейобентоса юго-восточной части залива Сиваш, 2017 г.

временного компонента – псевдомейобентосной фауны по численности преобладали личинки комаров – от 0,5 до 35 % от общей численности, представители остальных групп – олигохеты и анизоподы – составляли менее 1 % (см. рис. 3, б).

Исследование макрозообентоса юго-восточной части залива Сиваш проводилось до перекрытия СКК в 2013 г. [Витер, Алемов, 2015], и после – в 2016 и 2017 гг. В составе донных сообществ в районе залива Сиваш в 2013 г. отмечен 21 вид макрозообентоса, в то время как в 2016 г. – 7 видов, в 2017 г. – 10. К 2016–2017 гг. снизилось видовое богатство ракообразных, не обнаруживались актинии, немуртины, олигохеты. На отдельных станциях число видов в 2013 г. составляло 8–13,

в 2016 – 3–5, в 2017 г. – 5–6 (рис. 4). По данным [Шадрин и др., 2016], в 2015 г. этот показатель достигал 9. Видовое богатство макрозообентоса до строительства СКК в 1955 г. [Виноградова, Виноградов, 1960] составило 33 вида. Таким образом, к 2017 г. количество обнаруженных видов макрозообентоса в 4–8 раз ниже, чем отмечалось до строительства СКК.

В 2013 г. значения численности макрозообентоса изменялись в пределах от 535 до 17 885 экз. · м⁻², а значения биомассы – от 20,3 до 395,8 г · м⁻² соответственно. В 2016 г. численность составляла от 7665 до 38 746 экз. · м⁻², биомасса – 11,5–84,4 г · м⁻². В 2017 г. количественные характеристики бентосных сообществ изменялись в пределах от 162 до 12 458 экз. · м⁻²



Рис. 4. Таксономическая структура бентосных сообществ в районе Арабатской стрелки в 2013, 2016 и 2017 гг.

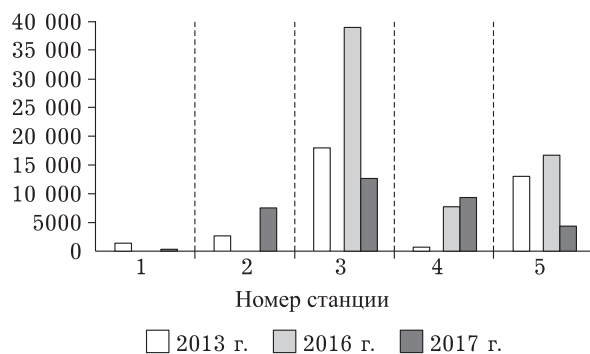


Рис. 5. Численность макрозообентоса (экз. · м⁻²) в районе Арабатской стрелки в 2013, 2016 и 2017 гг.

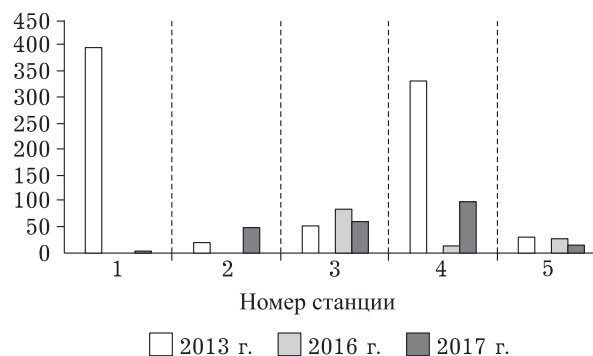


Рис. 6. Биомасса макрозообентоса (г · м⁻²) в районе Арабатской стрелки в 2013, 2016 и 2017 гг.

и от 1,8 до 98,6 г · м⁻² – численность и биомасса соответственно (рис. 5, 6).

Ранее, в 1955 г., численность макрозообентоса южной части Сиваша, представленного в основном личинками Chironomidae и *Artemia salina*, максимально составляла 15 180 экз. · м⁻², а средняя биомасса колебалась от 0,2 до 8,9 г · м⁻² [Виноградова, Виноградов, 1960], – в целом можно отметить, что средняя численность мало изменилась, однако за счет увеличения после длительного распреснения таксономического разнообразия в первую очередь появления моллюсков, биомасса макрозообентоса за прошедшие десятилетия увеличилась значительно. Обратный процесс – уменьшение биомассы при относительно неизменной численности, наблюдаемый с 2013 по 2017 г., протекает с заменой крупных двустворчатых моллюсков мелкими брюхоногими, с элиминацией полихет, что привело к общему снижению средней биомассы в исследуемом районе на фоне повышающейся солености. В 2013 г. по биомассе доминировали моллюски *Abra segmentum* и *Cerastoderma glaucum*, по численности – *A. segmentum* и *Hydrobia acuta*. В 2017 г. по биомассе доминировал моллюск *C. glaucum*, по численности – *H. acuta* и Chironomidae. Преобразования в трофической структуре донных сообществ увеличили значимость детритофагов по численности, – если в 2013 г. они составляли 83 %, то в 2017 г. – 97,8 %. По биомассе отмеченное в 2017 г. доминирование церастодермы увеличило долю сестонофагов до 64,6 %, уменьшив значимость детритофагов с 61,8 (2013 г.) до 35,7 %. Высокая доля численности детритофагов мо-

жет быть связана с низкой интенсивностью циркуляции вод, которая обусловлена только стонно-нагонными явлениями, когда процесс седиментации органической взвеси преобладает над процессом ее переноса [Кузнецов, 1980]. Возросшая доля по биомассе сестонофагов является закономерной, так как данная группировка представлена достаточно крупными видами двустворчатых моллюсков.

За период с 2013 по 2017 г. уменьшилось таксономическое и видовое разнообразие – отсутствуют Nemertea, Platyhelminthes, Anthozoa, Oligochaeta, уменьшилось количество видов полихет – с 5 до 1; ракообразных – с 5 до 2 (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Донные отложения юго-восточной части залива Сиваш (в районе Арабатской стрелки) по содержанию НУ и ТМ можно классифицировать как природно-чистые. Содержание ТМ в данной акватории на большинстве станций намного ниже их средней концентрации в земной коре. Судя по содержанию ХЭВ, состояние водоема не столь благополучное. Всего одна станция характеризуется чистыми морскими грунтами (ст. 3), ст. 1 и 2 являются умеренно загрязненными, на ст. 4 отмечены уровни ХЭВ, пагубно влияющие на донное сообщество [Мионов и др., 1986]. Вероятно, повышенные уровни загрязнения органическими веществами связаны с частыми гипоксическими и аноксическими явлениями, вызывающими массовую гибель биоты. На это указывает и характерный запах дон-

Макрозообентос района юго-восточной части залива Сиваш, 2013, 2016 и 2017 гг.

Тип	Класс	Таксон	Вид	2013 г.					2016 г.					2017 г.						
				1	2	3	4	5	3	4	5	1	2	3	4	5				
Mollusca	Bivalvia		<i>Abra segmentum</i> (Récluz, 1843)	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
			<i>Cerastoderma glaucum</i> (Bruguère, 1789)	+		+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			<i>Lentidium mediterraneum</i> (O. G. Costa, 1830)	+																
			<i>Mytilaster lineatus</i> (Gmelin, 1791)		+															
			<i>Pitar rudis</i> (Poli, 1795)			+														
			<i>Bittium reticulatum</i> (da Costa, 1778)																	
Gastropoda			<i>Hydrobia</i> W. Hartmann, 1821	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
			<i>Retusa truncatula</i> (Bruguère, 1792)	+				+												
			<i>Amphibalanus improvisus</i> (Darwin, 1854)																	+
Arthropoda	Hexanauplia		<i>Eurydice pontica</i> (Czerniavsky, 1868)	+																
			<i>Gammarus insensibilis</i> Stock, 1966	+	+	+	+	+												
Annelida	Polychaeta		<i>Gammarus</i> Fabricius, 1775																	
			<i>Idotea balthica</i> (Pallas, 1772)		+			+												
			<i>Lekanesphaera hookeri</i> (Leach, 1814)	+	+	+	+	+												
			<i>Iphinoe tenella</i> Sars, 1878																	
			Chironomidae																	
			<i>Alitta succinea</i> (Leuckart, 1847)	+																
			<i>Hediste diversicolor</i> (O. F. Müller, 1776)	+																
			<i>Nephtys hombergii</i> Savigny in Lamarck, 1818																	
			<i>Genetyllis tuberculata</i> (Bobretzky, 1868)																	
			Polychaeta																	
Cnidaria	Clitellata		Oligochaeta	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
			<i>Actinia equina</i> (Linnaeus, 1758)	+																
			<i>Sagartiogeton undatus</i> (Müller, 1778)	+																
Nemertea																				
Platyhelminthes																				

Примечание. "+" указывает на присутствие таксона.

ных отложений. Данный факт также подтверждается увеличением в последние годы содержания взвешенного органического вещества [Шадрин и др., 2016].

Микробное сообщество донных отложений зал. Сиваш по своим количественным характеристикам сходно с таковым в районах прибрежной акватории Севастополя с повышенной антропогенной нагрузкой и загрязнением органическими веществами [Бурдиян, 2004]. Высокие показатели численности анаэробных бактерий свидетельствуют о наличии большого количества отмершей органики. Превалирование во всех пробах показателей ТБ над СРБ указывает на процессы окисления сероводорода тионовыми бактериями и о наличии бактериального (тионового) фильтра, препятствующего проникновению сероводорода в близлежащие слои воды и грунта. Количественные показатели ГТБ характерны для акваторий с высоким уровнем содержания органического вещества, а, поскольку его приток извне крайне ограничен в условиях прекращения стока из СКК, повышенное его содержание можно связать с интенсивной гибелью биоты в водоеме, одной из причин которой, по всей видимости, является изменение солености залива.

Описанные выше явления повлекли за собой изменения и в таксономической структуре донных ценозов как для макрозоо-, так и для мейобентоса.

Наблюдаемый переход залива Сиваш от гипергалинного (45–80 ‰) к ультрагалинному (более 75–80 ‰) состоянию [Жирков, 2010] сходен с таковым в некоторых частях Аральского моря, но там процесс “растянут” на десятилетия, а здесь наблюдаются резкие изменения в течение трех лет с момента перекрытия СКК. Поэтому отмеченные негативные изменения в таксономической структу-

ре и плотности поселений мейобентоса также имеют более выраженную форму. Необычным, по мнению авторов, является отсутствие на более южных станциях нематод. Однако в исследованиях бентоса Аральского моря также наблюдается период, когда в сводных таблицах массовых видов свободноживущих беспозвоночных данной акватории вообще не упомянуты нематоды [Миклин и др., 2016]. В обзорной работе [Плотников, 2016] приведены данные [Mokievsky, Miljutina, 2011] о том, что в гипергалинном Бол. Арале в 2003 г. найдено 12 форм нематод, которые указаны для Аральского моря впервые и не обнаружен ни один, ранее для него характерный. Следствие ли это крайне слабой изученности фауны нематод, и эти 12 форм являются аборигенами, или они вселились при осолонении – пока неизвестно, но можно предположить, что на каком-то этапе ранее обитавшие формы исчезли, а вселились новые. Возможно, что и проведенное исследование в южной части залива Сиваш пришлось на подобный период смены видового состава основных компонентов эвмейобентоса.

Для макрозообентоса в период с 2013 по 2017 г. отмечено сокращение числа крупных таксонов и количества видов, заметное снижение биомассы и (на ст. 1, 3, 5) численности. Это можно связать с ростом концентрации солей в водоеме, приводящим к элиминации чувствительных к солености видов, подтвержденное тем, что наименьшие изменения обнаружены на участке с минимальной соленостью (ст. 1). Меняется и трофическая структура, – по биомассе начали доминировать крупные сестонофаги. Вероятно, изменения гидроэкологических условий приводят к обеднению ценозов, что сказывается и на интегральных показателях: так, индексы Шеннона [Wilm, 1968] и Пиелю [Pielou,

Т а б л и ц а 3

Показатели разнообразия сообщества макрозообентоса юго-восточной части залива Сиваш 2013, 2017 гг.

Номер станции	2013 г.					2017 г.				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Индекс Шеннона (по биомассе)	1,83	0,97	1,63	1,91	1,36	1,24	1,47	1,17	1,29	1,45
Индекс выравненности Пиелю	0,51	0,31	0,54	0,6	0,37	0,48	0,52	0,45	0,43	0,52

1966] (табл. 3) в целом оказались выше в 2013 г., чем в 2017 г.

Проведенные ранее многолетние исследования трансформации донного сообщества в результате изменения солености в оз. Донузлав (западный Крым), показало, что такого рода процессы протекают на протяжении не менее 35 лет [Болтачева и др., 2002]. В связи с этим для залива Сиваш данные работы не теряют актуальности как в ближайшее время, так и в последующие десятилетия. Результаты комплексных санитарно-биологических исследований дают информацию как о текущем экологическом состоянии водоема, так и о закономерностях трансформации сообщества в условиях изменяющейся окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные комплексные санитарно-биологические исследования через три года после прекращения функционирования СКК на территории Крымского полуострова, перекрытие которого привело к резкому сокращению сброса пресной воды в мелко-водный полузамкнутый залив Сиваш, показали:

– Полученные данные по содержанию основных классов поллютантов свидетельствуют об отсутствии загрязнения НУ и ТМ, при этом отмечен несколько завышенный уровень органического загрязнения.

– Количественные показатели микробного сообщества донных отложений залива указывают на увеличение их загрязнения органическими веществами.

– Рост солености в водоеме вызвал перестройку основных компонентов донного сообщества, таких как мейо- и макрозообентос, выражающуюся в снижении показателей биоразнообразия и изменении таксономической структуры биоценоза.

– В связи с вероятным продолжением роста солености залива, можно прогнозировать дальнейшее изменение видового разнообразия данного биоценоза [Балушкина и др., 2009; Belmonte et al., 2012]. Глубину такого рода перемен могут показать только многолетние исследования, поскольку стабилизация сообщества в условиях смены солености может занять не одно десятилетие.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИМБИ по теме государственного задания “Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем” (№ гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2), ФГБУН МГИ по теме № 0827-2018-0004 “Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей”.

ЛИТЕРАТУРА

- Балушкина Е. В., Голубков, С. М., Голубков М. С., Литвинчук Л. Ф., Шадрин Н. В. Влияние абиотических и биотических факторов на структурно-функциональную организацию экосистем соленых озер Крыма // Журн. общ. биологии. 2009. Т. 70, № 6. С. 504–514.
- Болтачев А. Р., Карпова Е. Л., Саксаганский В. В. Трансформация ихтиоценоза Восточного Сиваша (Азовское море) под влиянием антропогенных факторов // Современные проблемы теоретической и практической ихтиологии: сб. науч.-практ. конф. Одесса: Одес. нац. ун-т, 2011. С. 40–43.
- Болтачева Н. А., Колесникова Е. А., Ревков Н. К. Фауна макрозообентоса лимана Донузлав (Черное море) // Экология моря. 2002. Вып. 62. С. 10–13.
- Бурдиян Н. В. Анаэробная микрофлора донных осадков Севастопольских бухт (Черное море) // Там же. 2004. Вып. 66. С. 22–24.
- Бурдиян Н. В. Сульфатредуцирующие, тионовые, денитрифицирующие бактерии в прибрежной зоне Черного моря и их роль в трансформации нефтяных углеводородов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Севастополь, 2011. 24 с.
- Бурксер Е. С. Солоні озера та лимани України // Тр. физ.-мат. отд-ния ВУАН. 1928. Т. 8. С. 59–63.
- Венедиктова О. И., Роговая О. Г., Тихомирова И. Ю. Влияние физико-химических свойств донных осадков на сорбционную способность на примере водоемов Ленинградской области // Науч. ведомости Белгород. гос. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2017. Т. 41, № 25 (274). С. 12–20.
- Виноградова З. А., Виноградов К. О. Зообентос східного Сивашу // Праці Ін-ту гідробіології. 1960. № 35. С. 50–71.
- Витер Т. В., Алемов С. В. Сообщества макрозообентоса в районе Арабатской стрелки (Азовское море) // Понт Эвксинский – 2015: мат-лы конф. для молодых ученых. Севастополь: DigitPrint, 2015. С. 34–36.
- Воробьев В. П. Гидробиологический очерк Восточного Сиваша и возможности его рыбохозяйственного использования // Тр. АзЧерНИРО. 1940. Вып. 12. С. 69–164.

- Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М.: Academia, 2003. 397 с.
- Довгаль И. В. Водные беспозвоночные // Природа Сивашского региона и влияние на нее человека (состояние изученности и библиография). Киев: Wetlands International, 2005. С. 20–23.
- Жирков И. А. Жизнь на дне. Биоэкология и биогеография бентоса. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2010. 453 с.
- Жугайло С. С., Авдеева Т. М., Пугач М. Н., Аджиумеров С. Н., Аджиумеров Э. Н. Современное состояние гиперсоленых озер Крыма по гидрохимическим и экологическим показателям // Тр. ЮгНИРО. 2017. Т. 54. С. 116–122.
- Кузнецов А. П. Экология донных сообществ Мирового океана. М.: Наука, 1980. 244 с.
- Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа, регламентированная в документе М049-П/02. СПб.: ООО "Спектрон", 2002. 16 с.
- Миклин Ф., Аладин Н. В., Плотников И. С., Смулов А. О., Гонтарь В. И. Возможное будущее Аральского моря и его фауны // Астрахан. вестн. экол. обр. 2014. № 2 (36). С. 16–37.
- Миронов О. Г., Миловидова Н. Ю., Кирюхина Л. Н. О предельно допустимых концентрациях нефтепродуктов в донных осадках прибрежной зоны Черного моря // Гидробиол. журн. 1986. Т. 22, № 6. С. 76–78.
- Митропольский А. Ю., Безбородов А. А., Овсяный Е. И. Геохимия Черного моря. Киев: Наук. думка, 1982. 114 с.
- Мокиевский В. О. Экология морского мейобентоса: количественное распределение, таксономическое разнообразие и организация сообществ: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2012. 47 с.
- Осмелкин Е. В., Иванов Д. В., Зиганшин И. И. Характеристика донных отложений пойменных озер нижнего течения р. Сура // Рос. журн. прикл. экол. 2015. № 4 (4). С. 33–38.
- Плотников И. С. Многолетние изменения фауны свободноживущих водных беспозвоночных Аральского моря. СПб.: ЗИН РАН, 2016. 168 с.
- Плотников И. С. Изменение видового состава фауны свободноживущих беспозвоночных (Metazoa) Аральского моря // Тр. Зоол. ин-та РАН. 2013. Приложение № 3. С. 41–54.
- Практикум по микробиологии / под ред. А. И. Нетрусова. М.: Изд. центр "Академия", 2005. 608 с.
- Романов А. С., Орехова Н. А., Игнатъева О. Г., Коновалов С. К., Овсяный Е. И. Влияние физико-химических характеристик донных осадков на распределение микроэлементов на примере бухт Севастополя (Черное море) // Экология моря. 2007. Вып. 73. С. 85–90.
- Руководство по методам химического анализа морских вод / под ред. С. Г. Орадовского. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 208 с.
- Сергеева Н. Г., Колесникова Е. А., Латушкин А. А., Чепыженко А. А. Разнообразие мейобентоса рыхлых грунтов озера Сиваш // Биоразнообразие и устойчивое развитие: тез. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. Симферополь: Крымский науч. центр, 2014. С. 323–325.
- Совга Е. Е., Щурова Е. С. Ресурсный потенциал озера Сиваш и современное экологическое состояние акватории // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. № 27. С. 276–283.
- Соколова Е. А. Распространение сульфатредуцирующих бактерий и их функционирование в донных отложениях континентальных водоемов разного типа: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок, 2004. 21 с.
- Шадрин Н. В. Ракообразные в гиперсоленых водоемах: специфика существования и адаптация // Актуальные проблемы изучения ракообразных континентальных вод: мат.-лы лекций и докл. Междунар. школы-конф. Борок, 2012. С. 316–319.
- Шадрин Н. В., Сергеева Н. Г., Латушкин А. А., Колесникова Е. А., Киприянова Л. М., Ануфриева Е. В., Чепыженко А. А. Трансформация залива Сиваш (Азовское море) в условиях роста солености: изменения мейобентоса и других компонент экосистемы (2013–2015 гг.) // Журн. Сиб. фед. ун-та. Сер. Биология. 2016. Т. 9, № 4. С. 452–466.
- Щурова Е. С., Станичная Р. Р., Станичный С. В. Использование спутниковых данных для исследования современного состояния залива Сиваш // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 3. С. 61–64.
- Belmonte G., Moscatello S., Batogova E. A. (eds.). Fauna of hypersaline lakes of the Crimea (Ukraine) // Thalassia Salentina. 2012. N 34. P. 11–24.
- Evaporation estimate for the Dead Sea: Essential considerations for saline lakes. The dead Sea: The lake and its setting / eds. I. Steinhorn, T. M. Niemi, Z. Ben-Avraham, J. R. Gat. Oxford: Oxford University Press, 1997. P. 122–132.
- Mokievsky V. O., Miljutina M. A. Nematodes in meiofauna of the Large Aral Sea during the desiccation phase: Taxonomic composition and redescription of common species // Rus. Journ. Nematol. 2011. Vol. 19, N 1. P. 31–43.
- Pielou E. C. The measurement of diversity in different types of biological collections // J. Theoret. Biol. 1966. Vol. 13. P. 131–144.
- Semprucci F., Frontalini F., Sbroccea C., du Châtelet E. A., Bout-Roumazielles V., Coccioni R., Balsamo M. Meiobenthos and free-living nematodes as tools for biomonitoring environments affected by riverine impact // Environ. Monitoring and Assessment. 2015. Vol. 187, N5. P. 1–19.
- Wilm J. L. Use of biomass units in Shannon's formula // Ecology. 1968. Vol. 44, N 1. P. 153–156.
- Zeppilli D., Sarrazin J., Leduc D., Arbizu P. M., Fontaneto D., Fontanier C., Gooday A. J., Kristensen R. M.,

The Ecological Status of the South-Eastern Part of the Sivash Gulf (the Azov Sea) in Salinity Change Conditions

O. V. SOLOVEVA¹, E. A. TIKHONOVA¹, S. V. ALYOMOV¹, N. V. BURDIYAN, T. V. VITER¹,
E. V. GUSEVA¹, E. A. KOTELYANETS², T. A. BOGDANOVA¹

¹ A. O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS
299011, Sevastopol, Nakhimov ave. 2
E-mail: tihonoval@mail.ru

² Marine Hydrophysical Institute of RAS
299011, Sevastopol, Kapitanskaya str. 2

The estimation of the current ecological state of the Sivash Gulf (the southern part of the Eastern Sivash) was conducted in the conditions of its water regime changes. According to the obtained concentrations of the main pollutants classes, the prevailing type of anthropogenic impact on the ecosystem state of the investigated water area is a reduction in the freshwater runoff. It caused a rise in the salinity of the water. The quantitative indices of the microbial community of sea bottom sediments of the bay characterize their contamination by organic substances. The increase of salinity in the basin caused restructuring of the bottom community main components. Meio- and macrozoobenthos manifested decrease in biodiversity indicators and change in the taxonomic structure of the biocenosis.

Key words: Sivash Gulf, physico-chemical indicators, biogeocenosis, macrozoobenthos, meiobenthos, bacteria, heavy metals.