

УДК 574.24:550.4

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДОННЫХ ОСАДКОВ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИСТОПАТОЛОГИЙ ДВУСТВОРЧАТОГО МОЛЛЮСКА *Anadara kagoshimensis* В РАЗНЫХ РАЙОНАХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2017 г. Г. А. Колючкина¹, Д. Ф. Будько¹, В. К. Часовников², В. П. Чжу²¹Институт океанологии им П.П. Шишова РАН, Москва, Россия²Южное отделение Института океанологии им. П.П. Шишова РАН, Геленджик, Россия
e-mail: galka.sio@gmail.com

Поступила в редакцию 14.06.2016 г., после доработки 01.12.2016 г.

При увеличении антропогенной нагрузки на окружающую среду проблемы, связанные с ответом организма на загрязнения естественных мест обитания, становятся особенно актуальными. В настоящей работе мы попытались выявить корреляции между донными осадками и локальной изменчивостью гистопатологий у *Anadara kagoshimensis* (Bivalvia) в четырех районах северо-восточного побережья Черного моря. В качестве характеристик донных осадков мы использовали гранулометрический состав, окислительно-восстановительный потенциал поровой воды, содержание тяжелых металлов, бензо- α -пирена и ДДТ. Анализ полученных данных позволил выявить различия в геохимическом фоне исследованных акваторий и гистопатологическом состоянии моллюсков из этих районов. Из десяти исследованных элементов, бензо- α -пирена и ДДТ превышение нормы содержания в донных осадках зафиксировано только для Ni. Проведенный анализ указывает на связь между накоплением в донных осадках Ni и увеличением частоты тяжелых гистопатологий. Помимо причин, непосредственно связанных с загрязнением, возникновение легких патологий могут обуславливать “естественные” причины, в частности, повышенное содержание коричневых клеток в соединительной ткани пищеварительной железы, возможно, связано с возрастом моллюсков.

DOI: 10.7868/S0030157417060077

ВВЕДЕНИЕ

Гистопатологические изменения являются интегральным результатом различных биохимических и цитологических процессов. Гистологическое исследование может точно охарактеризовать степень повреждения организма, и, в частности, состояние гонад [40], что важно для прогнозирования репродуктивного потенциала популяции [42]. У двустворчатых моллюсков, являющихся важным объектом марикультуры и экологического мониторинга, идентификация возникающих патологий и дисфункций в организме важна для понимания причин популяционных изменений [10] и выявления последствий загрязнения окружающей среды [39]. Возникновение гистопатологий у двустворчатых моллюсков может быть связано с воздействием на организм различных факторов: доступности пищи [32], зараженности паразитами [19], дефицита кислорода [30], присутствия в среде загрязняющих веществ [38] или других негативных воздействий [32]. У моллюсков в районах с повышенной антропогенной нагрузкой отмечаются такие патологические изменения в тканях, как увеличение

содержания липофусцина, вакуолизация пищеварительных клеток пищеварительной железы (далее ПЖ), атрофия эпителия ПЖ, полнокровие жабр, вакуолизация ооцитов [10; 18; 39; 43]. Эти признаки считаются индикаторами загрязнения окружающей среды [40; 41; 43].

В Черном море на рыхлых грунтах двустворчатые моллюски являются доминирующей группой макрозообентоса до глубин 100–130 м [34]. Среди них в последние десятилетия увеличилась роль вселенца из западной Пацифики – *Anadara kagoshimensis* [7; 20]. Этот сравнительно крупный (длина раковины до 85 мм [35]) вид в некоторых районах стал занимать доминирующие позиции [16] и образовывать промысловые скопления [7; 14]. По типу питания анадара является фильтратором и питается сестоном [23]. Как и другие двустворчатые моллюски-фильтраторы, анадара, профильтровывая большие объемы морской воды, вступает в контакт с разнообразными загрязняющими веществами и играет значительную роль в биоседиментации [23]. Северо-восточное побережье Черного моря является рекреационной зоной, однако и здесь есть источники загрязнения

морской среды тяжелыми металлами и нефтяными углеводородами: морские порты, судоремонтные и вагоноремонтные заводы, нефтеперерабатывающие предприятия, муниципальные сооружения для очистки сточных вод [11]. Изучение изменчивости гистопатологий популяции анадары в 2003–2008 гг. на северо-восточном побережье Черного моря не выявило патологий гонад, но позволило найти положительную корреляцию между частотой гистопатологий и содержанием кадмия в донных осадках и мягких тканях анадар [10].

В настоящем исследовании мы продолжаем изучение гистопатологий анадар и выявляем корреляции между локальной изменчивостью гистопатологий и такими характеристиками донных осадков, как гранулометрический состав, окислительно-восстановительный потенциал поровой воды, содержание тяжелых металлов, бензо- α -пирена и ДДТ в четырех районах северо-восточного побережья Черного моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили в Российском секторе Черного моря в 2014 г. В качестве объекта были выбраны инфантные двустворчатые моллюски-фильтраторы *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) (*Bivalvia*: Arcidae). Места отбора проб охватывают открытые участки побережья – рекреационные районы и курорты: Анапская пересыпь в районе Бугазской косы (далее – Бугаз), пос. Дивноморское, бухта Инал и пос. Шепси (рис. 1). Помимо моллюсков, были собраны пробы донных осадков (далее – ДО) для определения гранулометрического состава, окислительно-восстановительного потенциала поровой воды (далее – ОВП), содержания тяжелых металлов (далее – ТМ), бензо- α -пирена (далее – БАП) и ДДТ. В районе Бугазской косы материал собирали 16–18 июня 2014 г. вручную с использованием легководолазного оборудования.



Рис. 1. Карта станций отбора проб моллюсков и ДО в 2014 г.

Для гистологического анализа было получено 7 экземпляров анадар с глубины 3 м на однородном участке песчаного дна и 6 экземпляров – с 10 м на илистом грунте в понижении рельефа. В районе пос. Дивноморское, бух. Инал и ст. Шепси материал собирали 2–10 июля 2014 г. в ходе экспедиции на МНИС “Ашамба”. Донные осадки отбирали с помощью дночерпателя Океан с площадью захвата 0.1 м² на глубинах 7.3–30 м. В каждом районе на пяти горизонтах глубин были получены однократные пробы ДО для анализа. Моллюсков собирали вручную с использованием легководолазного снаряжения на глубинах 7.3–15 м. В каждом из трех районов для гистологического анализа было собрано по 27–31 экземпляров анадар. Всего исследовано 101 экземпляр моллюсков. Точные глубины проб ДО представлены в табл. 1.

Погодные условия в исследуемых районах. В районе Бугаза отсутствуют источники постоянного пресного стока в море. Сбору материала в районе Бугазской косы предшествовала штилевая погода, температура придонной воды на глубине 10 м составляла 23 °С. Точки пробоотбора в остальных районах были расположены вблизи впадения рек: р. Мезыбь в пос. Дивноморское, р. М. Бжид в бух. Инал и р. Шепси в пос. Шепси. Сбору материала здесь предшествовала штормовая погода и ливневые дожди. В Дивноморском температура придонной воды на глубине обитания анадар составляла 26.9 °С, в Инале 24.4 °С, в Шепси 26.5 °С, термоклин зафиксирован не был. В Шепси ливневые дожди привели к сходу селевого потока по р. Шепси, на траверзе которой была расположена точка отбора проб моллюсков.

Для гистологического исследования органы моллюсков фиксировали формальдегидом с последующей стандартной гистологической проводкой [8]. Срезы окрашивали гематоксилином Караччи и эозином и изучали с помощью светового микроскопа “Микромед” при увеличении 400X–900X. Отмечали пол и стадию развития гонад [по 36], присутствие или отсутствие патологий у каждого моллюска, оценивали степень тяжести патологий [по 26] и определяли количество и процент моллюсков в выборке с каждой патологией.

Тяжелые металлы, бензо- α -пирен и ДДТ в донных осадках определяли согласно методическим указаниям ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.36–2002. Собранные чистым пластиковым пробоотборником пробы верхних 5 см ДО помещали в пластиковые зип-пакеты и хранили при –18 °С до анализа. Каждую пробу тотально, без разделения на фракции разлагали смесью азотной и соляной кислот в соответствии 1:3 (“царская водка”). Содержание элементов (Cd, Cu, Zn, Cr, Pb, Mn, Fe, Hg, Ni, Co) определяли на атомно-абсорбционном спектрометре

Таблица 1. Концентрация ТМ (мкг/г сух. веса), бензо-а-пирен (БАП, нг/г) и ДДТ (нг/г) в ДО северо-восточного побережья Черного моря в 2014 г. (“-” – данные отсутствуют), превышение нормы отмечено жирным шрифтом

Район	Глубина, м	Fe	Mn	Zn	Cu	Cr	Co	Ni	Pb	Cd	Hg	БАП	ДДТ
Бугаз *	3.0	3729	133	17.6	0.73	5.7	1.5	4.1	4.2	0.02	–	–	–
Бугаз *	10.0	14346	384	35.4	3.86	26.6	5.3	15.1	8.5	0.03	–	–	–
Дивноморск	10.0	15682	432	24.6	5.3	5.5	4.8	8.5	2.5	0.56	0.000	2.68	0.07
Дивноморск	15.0	13444	421	21.0	4.1	4.8	4.2	7.0	2.3	0.20	0.000	1.35	0.10
Дивноморск	20.0	16515	492	31.8	6.9	4.6	5.7	8.9	5.0	0.05	0.003	1.58	0.25
Дивноморск	25.0	15995	455	40.5	11.6	7.7	7.3	12.5	11.4	0.00	0.033	3.19	0.46
Дивноморск	30.0	15940	379	46.8	16.3	12.2	7.7	16.2	7.7	0.09	0.035	4.99	0.16
Инал	10.4	11785	830	28.3	10.3	7.2	4.5	59.3	8.2	0.05	0.009	2.47	0.22
Инал	14.5	15370	841	36.9	12.7	9.7	5.8	13.5	4.9	0.09	0.063	2.01	1.22
Инал	19.1	7220	294	24.7	9.2	5.9	2.8	6.8	4.9	0.24	0.020	1.61	0.83
Инал	23.0	20509	668	52.8	18.1	13.8	9.6	19.7	8.0	0.11	0.028	1.57	1.04
Инал	30.0	20456	600	54.7	21.5	13.7	9.2	19.3	9.4	0.16	0.035	5.11	0.29
Шепси	7.3	20790	683	51.7	21.3	12.9	9.0	18.1	8.8	0.00	0.041	5.92	0.28
Шепси	13.3	18832	778	43.3	16.0	10.6	8.5	17.2	7.4	0.00	0.029	2.80	0.13
Шепси	18.6	18165	808	38.0	10.0	7.1	8.6	12.9	6.0	0.05	0.024	0.00	0.00
Шепси	24.3	20391	703	54.6	19.4	10.8	10.3	17.7	9.8	0.03	0.033	2.95	0.00
Шепси	28.3	21915	723	59.6	19.6	11.4	11.1	19.2	9.8	0.00	0.045	5.32	0.17
Керченский пролив (2007–08 гг.)**		37800	630	61	–	93	54	37	–	–	–	–	–
Шельф Черного моря***		11800–32500	320–660	48	31	45–90	14	42	15–25	–	–	–	–
Норма****		–	–	140.0	36.0	100.0	20.0	35.0	85.0	0.80	0.300	25.00	2.50

* ICP-MS.

** По [12].

*** По [15].

**** Норма, согласно [31].

(ААС) “КВАНТ-2А” (КОРТЭК, Россия) в пробах из районов Дивноморское, Инал и Шепси и методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре “Agilent 7500a” (INTERLAB, США) в пробах из района Бугаза. Также было измерено содержание БАП и ДДТ. Концентрация загрязняющих веществ приведена для сухого веса.

В двух районах, Дивноморское и Инал, для 8 моллюсков из каждого района было проведено измерение содержания ТМ в тканях, за исключением Hg. Органы для анализа (жабры, ПЖ и ногу) выделяли на борту судна непосредственно после сбора моллюсков и хранили при температуре -18°C до анализа. Количественный химический анализ тканей анадар проводили в лаборатории физико-геологических исследований ИО РАН. Содержание Mn, Cu, Co, Pb, Cd, Ni и Cr измеряли методом ICP-MS, а содержание Fe и Zn на пламенном варианте ААС “КВАНТ-2А”. Разложение проб проходило в смеси из 1.5 мл дважды перегнанной концентрированной азотной кислоты (HNO_3) и 0.5 мл 30% H_2O_2 в тefлоновых сосудах при температуре не более 70°C . Контроль правильности анализа проводили с использованием международного стандартного образца Национального института стандартов Канады (SRM NIST): SRM IAEA MA – A2 Fish flash homogen. Концентрация ТМ приведена для сухого веса при расчёте биоаккумуляции и для влажного веса при сравнении с нормами СанПиН [4].

Коэффициент биоаккумуляции ТМ в тканях (безразм.) рассчитывали отдельно для каждого органа (на сух. вес) по отношению к содержанию ТМ в донных осадках.

Анализ гранулометрического состава грунта верхних 5 см ДО был выполнен сотрудниками Аналитической лаборатории ИО РАН водно-ситовым методом. Было определено содержание основных фракций: от менее 0.01 до более 10 мм. Для удобства далее приводится четыре стандартные градации гранулометрического состава грунта: пелит – менее 0.01 мм, алевроит – 0.01–0.1 мм, песок – более 0.1 до 1.0 мм и галька более 1 мм [17].

ОВП поровой воды регистрировали послойно (0–1 и 1–5 см) с помощью портативного ОВП-метра SanXin SX630.

Статистическую обработку и анализ данных проводили в программах Excel (Microsoft Corporation), Statistica (StatSoft Inc.) и Primer (Primer-E Ltd.). Поскольку количество станций в анализе было не достаточным для использования методов параметрического статистического анализа, для выявления попарных корреляций между непрерывными величинами (длина раковины моллюсков, характеристики ДО) мы использовали

метод непараметрического анализа Спирмана ($p = 0.05$) с поправкой Холма-Боферони (Statistica, Excel). Для выявления корреляций концентрации ТМ с факторами среды и географическим положением нормированное содержание каждого элемента анализировали с использованием пакета PERMANOVA (Permutational ANOVA/MANOVA, Primer). Для выявления концентраций ТМ, определяющих различия районов/глубин использовали SIMPER и PCA (Principal Component Analysis-анализ главных компонент) (Primer). Для выявления связей между гистопатологиями и характеристиками среды использовали непараметрический логистический анализ (логистическую регрессию) (Statistica).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Стадия репродуктивного цикла. Из 101 исследованного моллюска 99 были однополыми, а два – гермафродитами (один экземпляр был найден у пос. Дивноморское, один – в Шепси). Соотношение полов в выборках анадар оказалось примерно равным. У 58% анадар, собранных в районе Бугазской косы, гонады находились на начальной и развивающейся стадиях (2–3 стадия), и 42% моллюсков имели зрелые гонады (стадия 4). Анадары, собранные южнее и на 3 недели позже в районах пос. Дивноморское, бух. Инал и пос. Шепси, находились в 90% случаев на стадии готовности к вымету гамет: в гонадах были обнаружены только зрелые яйцеклетки и сперматозоиды, а предшествующих отмечено не было (стадия 4–5).

Гистопатологическая характеристика анадар. У обследованных анадар были обнаружены следующие легкие патологии: полнокровие жабр (сосуды и лакуны жабр были заполнены гемоцитами), гемоцитоз (повышенное по сравнению с нормой содержание гемоцитов в соединительной ткани вокруг пищеварительного тракта), коричневые клетки [18] (от англ. “brown cells” [28]; повышенное по сравнению с нормой количество клеток, заполненных липофусцино-подобным пигментом в соединительной ткани ПЖ) (рис. 2и). Среди патологий средней тяжести были отмечены: вакуолизация ооцитов (рис. 2з) и эпителиальная атрофия ПЖ (рис. 2г). У некоторых моллюсков были отмечены тяжелые генерализованные патологии: дегенерация ПЖ (рис. 2д) и некроз тканей (рис. 2е). В каждом исследованном районе у 3–26% моллюсков были найдены риккетсия-подобные организмы в пищеварительных клетках ПЖ (рис. 2в – врезка) и соединительной ткани ПЖ и гонад. По классификации Коста и соавт. [26] они соответствуют гистопатологиям средней тяжести. Многоклеточных паразитов у исследованных экземпляров анадар выявлено не было.

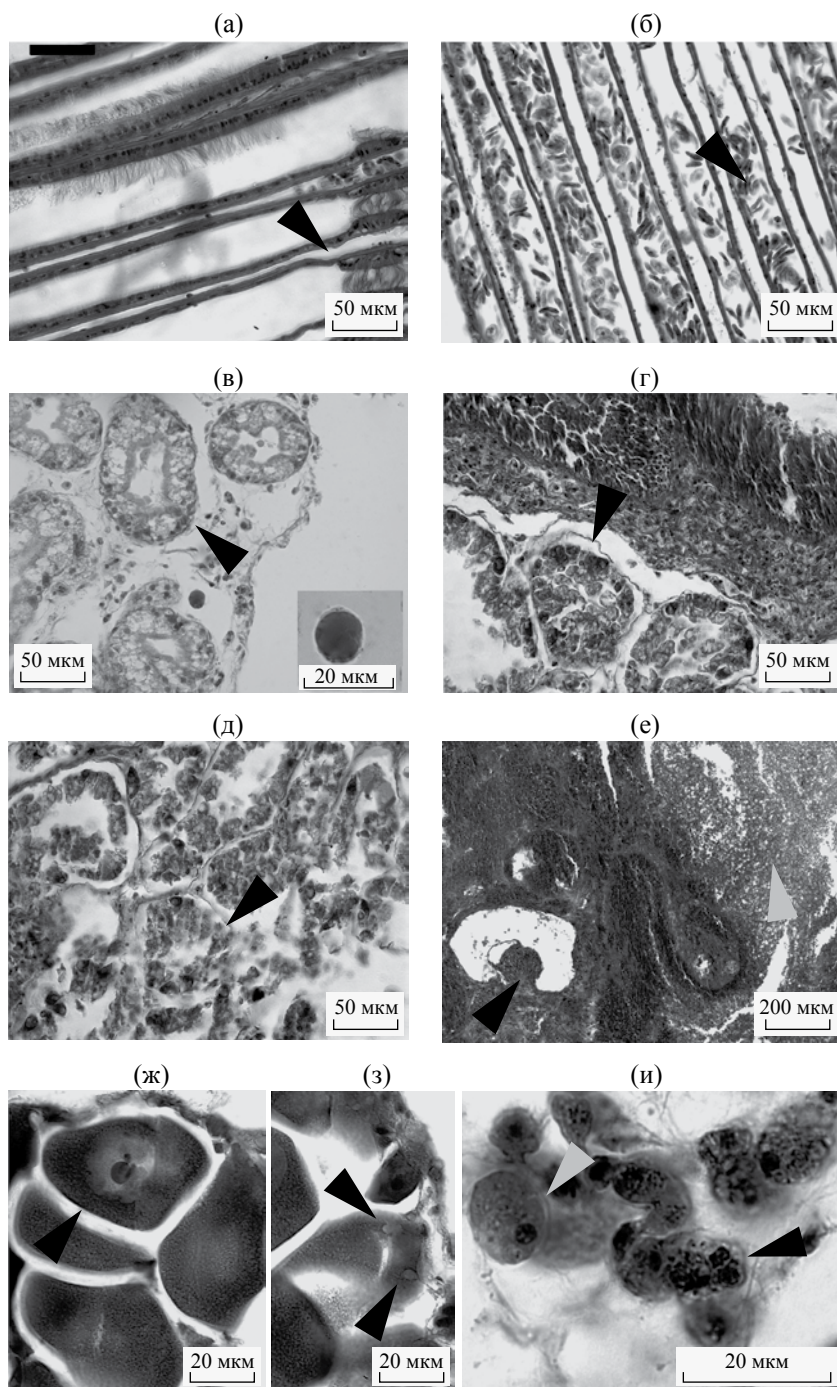


Рис. 2. Гистопатологии анадар. Продольный срез жабр в области латеральных ресничных соединений: (а) – норма (стрелкой указан кровеносный синус), (б) – патология – полнокровие (стрелкой указан кровеносный синус, заполненный гемоцитами). Последовательные стадии патологического процесса в ПЖ: (в) – нормальное состояние ацинусов (указан стрелкой), на врезке – риккетсии-подобный организм; (г) – эпителиальная атрофия (стрелкой указано отслоение эпителиальных клеток от базальной мембраны), (д) – дегенерация (стрелкой указан ацинус с дегенерирующими эпителиальными клетками, отслоившимися от базальной мембраны). Некротические изменения соединительной ткани и пищеварительной системы моллюсков: (е) – черной стрелкой указана некротизированная кишка с тифлозолем лишенная эпителиальных клеток, серой – скопление гемоцитов в ткани. Ооциты: (ж) – норма и (з) – вакуолизация (стрелками обозначены вакуоли). Коричневые клетки (и) в рыхлой соединительной ткани (серой стрелкой обозначены нормальные гемоциты, черной – коричневые клетки).

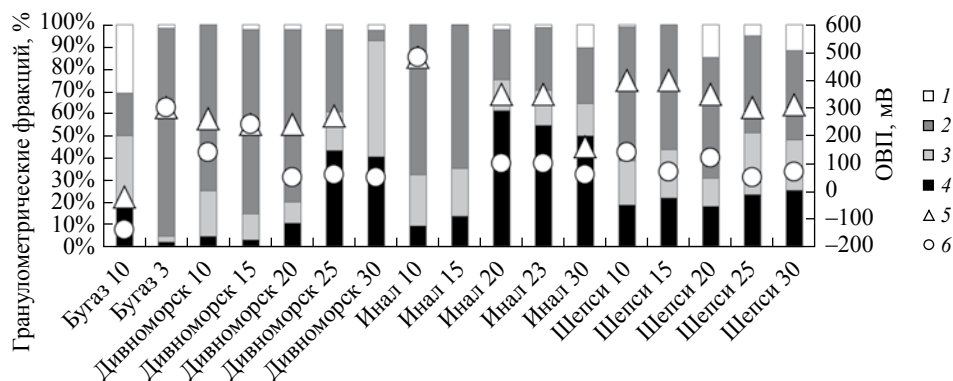


Рис. 3. Содержание гранулометрических фракций и ОВП ДО глубин 3–30 м четырех районов северо-восточного побережья Черного моря летом 2014 г. 1 – галька,%, 2–песок,%, 3 – алеврит,%, 4 – пелит,%, 5 – ОВП (0–1 см), 6 – ОВП (1–5 см).

В районе **Бугазской косы** в пробе анадр с 3 м глубины было отмечено пять видов патологий, а в пробе с 10 м – три вида, среди которых наиболее часто встречались коричневые клетки (рис. 2и). У одной особи, кроме повышенного содержания коричневых клеток, был отмечен гемоцитоз и полнокровие жабр, а также вакуолизация ооцитов. Тяжелых патологий в Бугазе отмечено не было. В **Дивноморском** было отмечено шесть видов гистопатологий. Здесь наблюдалась максимальная частота особей с полнокровием жабр и эпителиальной атрофией ПЖ. Пик частоты тяжелых гистопатологий был отмечен для бух. **Инал**: у 13% особей были отмечены некрозы тканей. У одной из особей с некрозом, гемоцитозом и повышенным количеством коричневых клеток стадия развития гонад соответствовала началу созревания яйцеклеток в отличие от всех остальных исследованных особей бух. **Инал**, гонады которых были зрелыми. В пос. **Шепси** уровень гистопатологий был несколько ниже, чем в Инале, но в целом выше, чем в Дивноморском. Не было отмечено случаев некроза тканей, но у 15% моллюсков была отмечена дегенерация ПЖ.

Гранулометрический состав ДО. Донные осадки исследованных районов были представлены заиленным песком и илом. Распределение фракций по глубинам было специфичным для каждого изученного района (рис. 3). В пробах ДО на глубинах 10–15 м до 60–70% фракций составляли пески. На глубине 20 м в Дивноморском и Шепси также доминировала песчаная фракция, а в Инале ее содержание не превышало 30%. На глубинах 25–30 м содержание песка не превышало 40% и преобладал алевропелит (суммарно алеврит и пелит) (до 60–90%). На станциях в районе Бугазской косы на глубине 3 м в пробах ДО доминировала песчаная фракция (93%), а на глубине 10 м осадки напротив

отличались низкой степенью сортированности (сходное содержание разных фракций в пробах ДО), что связано с локализацией этой станции в местном понижении рельефа. От пос. Дивноморское к пос. Шепси наблюдалось снижение сортированности фракций в пробах ДО (рис. 3). Корреляционный анализ подтвердил достоверное увеличение содержания пелитовой фракции с глубиной ($R = 0.77$, $p < 0.008$), а корреляции других фракций с глубиной были не достоверны.

ОВП ДО во всех точках, за исключением 10 м глубины в Бугазе, был положительным, что свидетельствует об окислительных условиях (рис. 3). ОВП (1–5 см) положительно коррелировал с содержанием песка ($R=0.58$) и отрицательно с глубиной ($R = -0.59$), однако проверка этих корреляций тестом Холма-Бонферони показала, что они не являются достоверными при множественных сравнениях, поэтому можно говорить лишь о некоторых тенденциях.

ТМ, БАП и ДДТ в донных осадках. Содержание ТМ в ДО на исследуемых глубинах представлено в табл. 1. Превышения норм органических загрязнителей в ДО отмечено не было. Превышение европейских норм концентраций элементов в донных осадках [29] было зафиксировано только для Ni в единственной точке, на глубине 10 м в бухте Инал. Здесь концентрация Ni была в 1.7 раз выше европейской нормы и в три и более раз превосходила концентрации этого элемента на других станциях. Сравнение содержания элементов со средними значениями их концентраций на шельфе Черного моря показало превышение по Ni на глубине 10 м и по Mn на глубинах 10–15 и 23 м в бух. Инал и на всех изученных глубинах в пос. Шепси. Наблюдалась достоверные корреляции содержания ТМ друг с другом, за исключением марганца, содержание которого коррелировало только с Ni, но

Таблица 2. Среднее (1), стандартное отклонение (2) и норма содержания ТМ в тканях анадар северо-восточного побережья Черного моря в 2014 г. (сухой и влажный вес, мкг/г)

Элемент	Пищеварительная железа		Жабры		Нога		Норма			
	Дивноморск		Дивноморск		Дивноморск					
	1	2	1	2	1	2				
Fe	378.5	103.3	523.2	264.0	335.3	84.2	270.3	113.1	176.2	28.2
Mn	3.4	1.0	6.1	4.0	10.1	2.6	7.6	4.6	5.3	2.4
Zn	12.6	3.1	11.9	4.1	26.3	17.1	38.9	8.5	38.9	7.2
Cu	12.0	2.7	14.4	4.8	7.0	0.9	4.5	3.9	3.2	3.9
Cr	0.5	0.4	3.3	2.9	3.3	6.9	1.8	4.4	0.8	1.7
Co	0.3	0.1	0.4	0.1	1.0	0.4	0.3	0.1	0.3	0.1
Ni	0.6	0.2	1.4	0.8	3.1	3.5	1.2	1.0	0.8	0.5
Pb	0.30	0.20	0.54	0.25	0.47	0.44	2.37	2.66	0.89	0.47
Cd	1.40	0.37	1.81	0.69	5.27	3.16	0.41	0.15	0.40	0.23
						Сухой вес				
Zn	2.62	0.70	3.61	0.87	2.44	1.70	7.54	1.81	7.90	1.51
Cu	2.48	0.56	4.51	1.62	0.64	0.08	0.90	0.85	0.68	0.86
Pb	0.06	0.05	0.18	0.11	0.04	0.04	0.60	0.65	0.18	0.10
Cd	0.29	0.08	0.58	0.27	0.50	0.32	0.08	0.02	0.08	0.05
						Влажный вес				
Zn						2.22	2.22	1.81	7.90	200*
Cu						0.20	0.20	0.85	0.68	30*
Pb						0.03	0.03	0.65	0.18	10**
Cd						0.38	0.38	0.02	0.08	2***

* Значения норм согласно [1].

** Значения норм согласно [4].

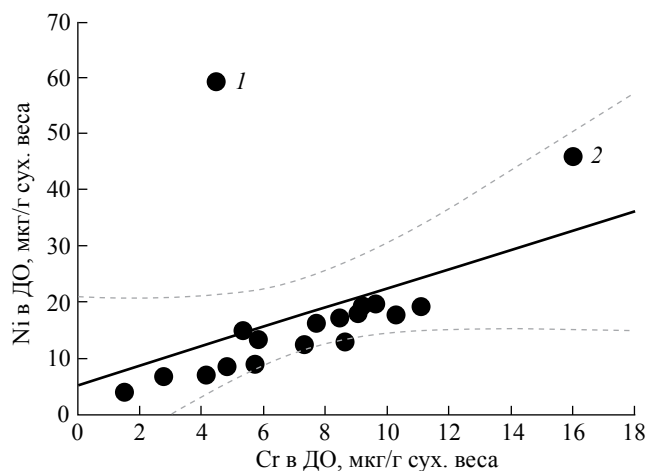


Рис. 4. Корреляция содержания Ni и Cr в ДО Бугаза, Дивноморского, Инала и Шепси в 2014 г. 1 – аномально высокое содержание Ni при нормальном содержании Cr в бух. Инал на 10 м глубине; 2 – средние содержания Ni и Cr на шельфе Черного моря укладываются в 95% доверительный интервал (пунктирная линия) регрессии (прямая линия).

малодостоверно (табл. 5). Содержание Ni в ДО на большинстве станций, за исключением 10 м в бух. Инал, показывало достоверную попарную корреляцию с другими ТМ. При этом точка с аномально высоким содержанием Ni не укладывалась в 95% интервал достоверных значений регрессии ни с одним из ТМ в ДО (например с Cr, рис. 4).

Непараметрический дисперсионный анализ (PERMANOVA) показал, что районы отличались по содержанию ТМ в ДО (табл. 3). ДО в пос. Дивноморское содержало повышенное по сравнению с остальными районами количество Cd, а ДО Бугаза – Cr (табл. 1). ДО пос. Шепси отличались более высокими концентрациями Pb, Zn, Cu, Mn, Co

и Fe по сравнению с остальными районами. ДО бух. Инал занимали промежуточное положение по содержанию ТМ. Диаграмма анализа принципиальных компонент, построенная на основании нормализованных концентраций 9-ти ТМ в ДО (за исключением Hg, концентрацию которой в Бугазе не измеряли), иллюстрирует эту зависимость (рис. 5а). Содержание БАП и ДДТ не зависело от района исследования и глубины (табл. 1 и 3).

Не было отмечено достоверных корреляций между характеристиками гранулометрического состава, ОВП ДО и содержанием тяжелых металлов, за исключением высокодостоверной обратной корреляции между содержанием Cr и песчаной фракции в ДО ($R = -0.73$). Наблюдались тенденции увеличения содержания Cu, Zn, Co и Pb с глубиной, Zn, Cu, Cr, Co, Ni и Pb с увеличением содержания пелита в донных осадках и Mn с увеличением ОВП (1 см). Однако при введении поправки на множественность сравнений эти корреляции оказались недостоверными.

Тяжелые металлы в тканях двустворчатых моллюсков. В органах моллюсков из бух. Инал и Дивноморского не было отмечено превышения норм СанПиН по содержанию ТМ (табл. 2). Были отмечены достоверные отличия в содержании ТМ, за исключением Cr, между органами моллюсков вне зависимости от района сбора (PERMANOVA, табл. 4, рис. 5б). В ноге наблюдались наибольшие концентрации Zn и Pb, наименьшие – Cu и Fe (табл. 2). Содержание Mn, Co, Ni, Cd, Cr в ноге было сходным с их содержанием в ПЖ, но ниже, чем в жабрах (табл. 2). В жабрах была отмечена наибольшая концентрация Mn, Co, Ni, Cd, Cr. Содержание Ni у одного моллюска из бух. Инал и одного из пос. Дивноморское составили 11.54 и 11.64 мкг/г, соответственно (в 3 раза больше среднего, табл. 2). В ПЖ было отмечено наименьшее

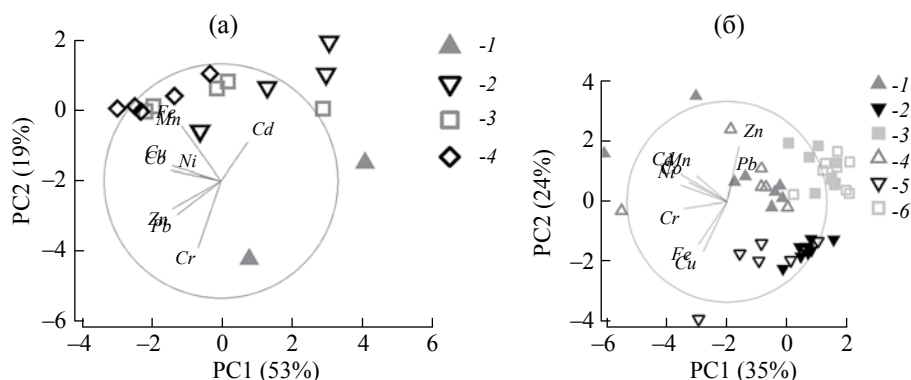


Рис. 5. Диаграммы PCA, построенные на основании нормализованных концентраций девяти ТМ (а) в ДО четырех районов и (б) в трех различных органах анадар из двух районов. (А): 1 – Бугаз, 2 – Дивноморское, 3 – Инал, 4 – Шепси; (Б): 1–3 – Инал, 4–6 – Дивноморское, 1,4 – жабры, 2,5 – ПЖ, 3,6 – нога анадар.

Таблица 3. Результаты непараметрического дисперсионного анализа (PERMANOVA) содержания ТМ и органических загрязнителей в ДО (основной тест и попарное сравнение районов по каждому ТМ или органическому загрязнителю отдельно). В ячейках указана достоверность при $p < 0.05$. Прочерки – сравнение невозможно

Районы	Fe	Mn	Zn	Cu	Cr	Co	Ni	Pb	Cd	Hg	БАП	ДДТ
Бугаз-Дивноморск										---	---	---
Бугаз-Инал										---	---	---
Бугаз-Шепси		0.003				0.041						
Дивноморск-Инал												
Дивноморск-Шепси	0.012	0.007	0.008	0.018	0.005	0.005	0.012			0.015		
Инал-Шепси												
Основной тест		0.005	0.038	0.006		0.016						

Таблица 4. Результаты непараметрического дисперсионного анализа (PERMANOVA) содержания ТМ в органах анадар. Различия между группами ТМ достоверны на уровне 0.001 (ANOSIM global R=0.984)

ТМ	Значения вероятности достоверности различий между параметрами, p				Станция-орган (комментарий)
	Жабры – ПЖ	Жабры – Нога	ПЖ–Нога	Инал-Дивноморское	
Zn	0.003	0.007	0.001	–	–
Pb	–	0.014	0.003	–	Различия достоверны только в Инале
Cu	0.001	0.002	0.001	–	–
Fe	0.004	0.013	0.001	0.046 (только в Ноге)	Достоверные различия по органам только в Дивноморском
Cr	–	–	–	–	–
Mn	0.002	–	–	–	–
Co	0.001	0.001	–	–	–
Ni	0.001	0.002	–	–	–
Cd	0.001	0.001	0.001	–	–

Таблица 5. Значения коэффициентов попарных корреляций для ТМ в ДО (верхняя правая часть таблицы) и для ТМ в тканях анадар (левая нижняя часть таблицы). Жирным шрифтом выделены значения, достоверные при $p < 0.05$ с поправкой Холма-Бонферони на множественность сравнений. Корреляции приведены для сух. веса

ТМ	Fe	Mn	Zn	Cu	Cr	Co	Ni	Pb	Cd	Hg
Fe		0.46	0.89	0.81	0.54	0.95	0.63	0.61	–0.35	0.51
Mn	0.13		0.43	0.49	0.17	0.52	0.60	0.28	–0.29	0.36
Zn	–0.53	0.23		0.92	0.75	0.96	0.75	0.78	–0.34	0.73
Cu	0.53	0.00	–0.67		0.64	0.86	0.77	0.67	–0.21	0.81
Cr	0.35	0.18	–0.32	0.43		0.64	0.73	0.67	–0.27	0.73
Co	0.24	0.55	–0.01	0.28	0.20		0.70	0.69	–0.34	0.62
Ni	0.14	0.54	0.17	0.01	0.34	0.70		0.68	–0.22	0.46
Pb	–0.19	0.28	0.50	–0.28	–0.01	–0.03	0.15		–0.56	0.56
Cd	0.44	0.33	–0.38	0.55	0.23	0.75	0.46	–0.41		–0.49

содержание Zn и Pb и наибольшее – Cu и Fe. Районы исследования не различались по содержанию ТМ в органах анадар. Наблюдались достоверные корреляции содержания некоторых металлов друг с другом (табл. 5).

Биоаккумуляция. Концентрация Fe, Mn, Cr, Co и Pb в ДО была выше, чем в моллюсках, а Cd, Cu,

Zn и Ni – ниже. В жабрах коэффициент биоаккумуляции Cd составлял 100 и 30 (в Инале и Дивноморском, соответственно), в ПЖ – 30 и 10, а в ноге – 10 в Инале и 2 в Дивноморском. При этом если концентрации Cd в анадарах были сходными для двух исследованных районов, то в ДО они различались на порядок, что и обусловило

разницу коэффициентов биоаккумуляции между двумя районами в 3 раза. В Дивноморском коэффициент биоаккумуляции Cu в ПЖ был равен 3, а в ноге 2, в Инале он был меньше 1. Коэффициент биоаккумуляции Zn был высок только для ноги, причем в Дивноморском (1.8) был выше, чем в Инале (1.4). У одного экземпляра, собранного близ пос. Дивноморское была отмечена биоаккумуляция Ni : содержание этого элемента в жабрах превышало его содержание в ДО в 1.7 раз. Для других 15-ти экземпляров из обоих районов биоаккумуляции по Ni отмечено не было. Интересно отметить, что концентрация Ni в жабрах экземпляра из Инала и Дивноморского была сходной, но биоаккумуляция этого элемента наблюдалась только для пос. Дивноморское, т.к. в Инале была отмечена высокая концентрация Ni в ДО.

Анализ корреляций гистопатологий, абиотических и биотических параметров. Достоверной корреляции тяжелых патологий и района исследования выявить не удалось, поскольку процент анадар с тяжелыми патологиями был низким во всех районах. Частота легких патологий достоверно отличалась в исследованных районах (PERMANOVA: $p < 0.05$) за исключением Шепси и Инала. В Шепси и Инале, в отличие от других районов, при попарном сравнении отличалась частота патологий средней тяжести ($p = 0.048$).

Не было отмечено достоверных корреляций частоты гистопатологических изменений с гранулометрическим составом грунта и ОВП в ДО. Содержание некоторых ТМ в ДО коррелировало с отдельными патологиями. Частота некроза у моллюсков коррелировала с содержанием в ДО Ni , однако, достоверность корреляции с поправкой на множественность сравнений была низкой ($p = 0.051$). Частота обнаружения повышенного количества коричневых клеток у моллюсков коррелировала с содержанием Cd в ДО, но также с низкой достоверностью ($p = 0.048$).

Была отмечена высокодостоверная корреляция между стадией развития гонад и дегенерацией ПЖ ($p = 0.001$): в Бугазе были отмечены только начальные стадии развития гонад (незрелые гаметы), и дегенерация ПЖ не наблюдалась; в остальных районах такая патология отмечалась, а гаметы были зрелыми. Высокодостоверная корреляция была отмечена также между длиной раковины моллюсков и наличием у них коричневых клеток ($p < 0.001$). У моллюсков с длиной раковины менее 30 мм коричневые клетки обнаружены не были, и в то же время не было обнаружено ни одного моллюска с длиной раковины более 55 мм без коричневых клеток. Достоверных корреляций гистопатологий друг с другом отмечено не было.

ОБСУЖДЕНИЕ

Гистологическое исследование анадар из четырех районов северо-восточного побережья Черного моря показало, что большинство моллюсков находилось в хорошем состоянии и только у нескольких экземпляров из бухты Инал были отмечены некрозы тканей, потенциально приводящие к гибели особей. Статистический анализ частоты гистопатологий позволил выявить различия в состоянии моллюсков из четырех районов северо-восточного побережья Черного моря. Разнообразие патологических изменений и тяжесть патологий возрастали с северо-запада на юго-восток в пределах исследованного региона. Собранный материал позволил провести анализ корреляций между частотой гистопатологий и рядом абиотических и биотических факторов.

ОВП и гранулометрический состав ДО. У анадар не было отмечено корреляций гистопатологий с ОВП. Так, в Бугазе на глубине 10 м, где значения ОВП подповерхностного слоя ДО были отрицательными, что указывает на дефицит кислорода, не было отмечено тяжелых необратимых патологических изменений. Возможно, это объясняется тем, что изучаемый вид моллюсков обладает повышенной устойчивостью к гипоксии благодаря наличию эритроцитов с гемоглобином, обладающим способностью запасать кислород. Анадары способны выживать до 12-ти дней при уровне кислорода менее 14% от насыщения [25]. Корреляций гистопатологий с гранулометрическим составом ДО также отмечено не было.

ТМ и органические загрязняющие вещества. Исследуемые районы характеризуются меньшим уровнем антропогенного пресса [11], чем, например, Керченский пролив [12] или северо-запад Черного моря [27]. Видимо, поэтому данные по современному содержанию ТМ в донных осадках прибрежной зоны Черноморского побережья Кавказа отрывочны и, в основном, относятся к наиболее загрязненным районам портов и крупных городов [11]. Таким образом, настоящее исследование позволяет расширить представление о современном уровне загрязнения изученных районов ТМ.

Наиболее токсичный элемент, ртуть, содержался в ДО исследованных районов в концентрациях на порядок более низких, чем установленные европейские нормы [29]. Содержание БАП и ДДТ было также в 5 и 2–35 раз ниже норм. Можно заключить, что по содержанию этих веществ в ДО исследованные районы были благополучными в отличие, например, от портовых акваторий [11].

Fe и Zn — широко распространенные в земной коре и одновременно эссенциальные элементы [37]. Накопление Zn в ноге моллюсков было незна-

чительным (коэффициент биоаккумуляции < 2), а его содержание в тканях моллюсков было меньше норм СанПиН на 2 порядка. Таким образом, накопление Zn в ноге моллюсков может быть связано с его ролью в метаболических процессах [37]. Кроме того, содержание как Zn, так и Fe в ДО варьировало в широких пределах, но не превышало европейских норм для Zn [29] и средних концентраций в ДО шельфа для Fe [15]. Содержание Zn в ДО исследуемых районов превышало средние концентрации в ДО шельфа, но было ниже, чем в более загрязненных водах Керченского пролива [12]. Поскольку корреляций между гистопатологиями и содержанием этих металлов не наблюдалось, и они попарно коррелировали с другими ТМ, можно сделать предварительные выводы о естественном происхождении этих элементов в ДО и недостоверной роли в гистопатологических изменениях у анадар исследуемого района.

Содержание Cd в ДО коррелировало с повышенным количеством коричневых клеток в соединительной ткани анадар. Известно, что коричневые клетки способны аккумулировать Cd [43]. Однако в нашем случае, анализ содержания Cd в ДО не показал превышений европейских норм [29], а его содержание в мягких тканях анадар было ниже норм СанПиН и содержания этого элемента в тканях других видов животных, собранных в незагрязненных районах [21]. Таким образом, факт корреляция содержания Cd и коричневых клеток нуждается в дальнейшем изучении. По нашим результатам, коэффициент биоаккумуляции Cd в тканях анадар достигал 100. Известно, что моллюски обладают способностью накапливать Cd в высоких количествах, превышающих его содержание в среде на несколько порядков, что обусловлено наличием в тканях пептидов – металлотионеинов, связывающих этот токсичный элемент в нерастворимые комплексы [24]. Возможно, что коричневые клетки также участвуют в нейтрализации этого элемента [43].

Коэффициенты биоаккумуляции Cr, Co и Pb не превышали единицы. Содержание Pb не превосходило допустимых норм СанПиН, а Co – содержания в органах моллюсков из незагрязненных местообитаний [33]. Такие значительные различия между коэффициентом биоаккумуляции этих ТМ и Cd могут быть связаны с преимущественным нахождением Cr, Co и Pb в составе глинистых и обломочных минералов (от 50% для Pb до 90% для Cr от валового содержания), и, как следствие, ограниченной биодоступностью [2; 5]. Это подтверждается наблюдаемой тенденцией увеличения содержания кобальта и свинца с глубиной, а также хрома, кобальта и свинца с увеличением содержания пелита в ДО. Cd, напротив, проявляет высокие адсорбционные способности при миграции в донных

осадках, и его концентрация не связана с содержанием пелитовой фракции.

Достоверной корреляции содержания Cu в ДО и гистопатологий отмечено не было. Но в ПЖ и ноге анадар, собранных у пос. Дивноморское, коэффициент биоаккумуляции Cu превышал единицу, причем в этом же районе была отмечена наибольшая частота атрофии эпителия ПЖ (27%). Сходные изменения были отмечены у анадар при искусственном добавлении в среду обитания сульфата меди. Атрофические изменения ПЖ наблюдались уже на третьи сутки экспозиции при достижении концентрации меди в тканях 150 мкг/г сух. веса и отсутствовали у контрольных образцов (7 мкг Cu/г сух. веса) [9]. В настоящем исследовании содержание Cu в ПЖ анадар было на порядок более низким – 10–23 мкг/г сух. веса (Дивноморское) и 7–16 мкг/г сух. веса (бух. Инал), поэтому можно предположить, что кроме воздействия Cu атрофия ПЖ у анадар могла быть связана и с другими факторами. Кроме того, содержание Cu в ДО исследуемого района характеризовалось скорее недостатком, а не избытком этого элемента по сравнению со средними его концентрациями в ДО шельфа, и коррелировало с содержанием других ТМ (табл. 5), что указывает на отсутствие дополнительных источников поступления этого элемента в море.

Содержание Ni в ДО коррелировало с частотой некрозов у анадар. Именно в бух. Инал, где содержание Ni в ДО превышало европейские нормы [29] и среднее содержание этого элемента в осадках шельфа [15], были отмечены некрозы тканей у 13% моллюсков, а жабры 26% особей отличались полнокровием. У 13% моллюсков в этом районе наблюдалось и повышенное содержание Ni в жабрах, превышающее 10 мкг/г сух. веса, что является пороговой концентрацией возникновения патологических процессов в тканях моллюсков [41]. Следует отметить, что фоновые значения для более загрязненного румынского сектора Черного моря составляют менее 5 мкг/г сух. веса мягких тканей анадар [31]. Поскольку, по нашим данным, концентрация Ni в бух. Инал на глубине 10 м не укладывалась в 95% доверительный интервал регрессии при попарном сравнении его с другими элементами, можно предположить, что в этой точке существовал дополнительный источник поступления Ni. По всей видимости, распределение Ni было мозаичным и/или его биодоступность была ограниченной, поскольку доля моллюсков с патологиями и высокой концентрацией этого элемента в тканях была невысокой. По нашим данным, наблюдалась тенденция повышения содержания Ni с увеличением содержания Mn в ДО. Кроме того, между Ni и Mn была отмечена высокодостоверная положительная корреляция в тканях анадар. В точке наибольшей

концентрации Mn – в бух. Инал на 10 м было отмечено чрезвычайно высокое значение ОВП ДО. В таких окислительных условиях из растворимой формы Mn^{2+} обычно протекает образование окисленных форм Mn^{4+} – нерастворимых аморфных гидроксидов – адсорбентов ТМ, в том числе Ni [2; 15]. Вполне вероятно, что высокие концентрации Ni на 10 м станции в Инале и тенденция зависимости между содержанием Ni и Mn в ДО могут объясняться адсорбцией Ni аморфными гидроксидами Mn, что значительно снижает его биодоступность и объясняет корреляцию с содержанием Mn [2; 15].

В ДО бух. Инал на глубинах 10–15 м и пос. Шепси на всех исследованных глубинах наблюдались аномальные концентрации Mn, превышающие среднее содержание этого элемента на шельфе в 2 раза [15] и значения по этому элементу в районе Керченского пролива на 25% [12]. Известно, что наибольшие концентрации Mn приурочены к устьевым участкам рек и особенно выше его концентрация во взвеси [15]. Поскольку пробоотбору предшествовали сильные дожди, а реки, в районе впадения которых в море были расположены точки отбора проб, лишены лиманных отстойников, можно предположить, что такой локальный максимум являлся следствием выноса терригенного материала, обогащенного Mn, с паводковыми водами после обильных дождей [6; 13; 15]. Высокие значения ОВП и корреляция с этим параметром содержания Mn в ДО указывает на преимущественно низкую биодоступность этого элемента [2; 15]. Сходные концентрации Mn были зафиксированы для жабр, ноги и ПЖ других видов моллюсков в незагрязненных акваториях [33].

Инфекции риккетсия-подобными организмами. Среди причин возникновения гистопатологий, кроме абиотических факторов, могут быть биогенные причины – паразитические поражения тканей и органов моллюсков. В настоящем исследовании в тканях анадар были отмечены облигатные внутриклеточные паразиты – риккетсия-подобные организмы. Сходные риккетсия-подобные организмы были также обнаружены у других видов черноморских моллюсков северо-восточного побережья (*Mytilus galloprovincialis*, *Chamelea gallina*) [3; 9]. Такие микроорганизмы встречаются в норме у большинства моллюсков, их наличие чрезвычайно редко коррелирует с воспалительными процессами в организме моллюсков [22]. Поскольку частота заражения моллюсков такими паразитами не коррелировала с другими патологиями, мы предполагаем, что зараженность риккетсия-подобными микроорганизмами не влияет на гистопатологическое состояние анадар в исследованном районе.

Возможные причины гистопатологий, не связанные с повышенными концентрациями загрязняющих

веществ. Возникновение легких патологий может объясняться и “естественными” причинами. Так, коричневые клетки, являются своеобразными почками накопления [19; 43]. Коричневые гранулы этих клеток содержат значительное количество нерастворимого пигмента липофусцина – продукта перекисного окисления липидов [28], накапливающегося в клетках с возрастом [43], а также при воспалительных процессах, вызванных паразитическими инфекциями [19] и загрязнением водоемов тяжелыми металлами [18]. Возраст черноморских анадар может достигать 9 лет и выше, причем их рост не останавливается в течение жизни, и, таким образом, длина раковины коррелирует с возрастом [35]. По нашим данным, частота появления коричневых клеток высокодостоверно положительно коррелирует с размером раковин анадар и слабодостоверно – с Cd в ДО. Вполне возможно, что с возрастом происходит накопление коричневых клеток в организме моллюсков.

Тяжелые необратимые патологии встречались менее чем у четверти моллюсков, что указывает на незначительное снижение репродуктивного потенциала популяции и не позволяет предсказать снижение численности анадар в исследованных районах. Отмеченная у некоторых моллюсков вакуолизация ооцитов может являться индикатором снижения репродуктивного потенциала популяции. Однако в настоящем исследовании такая патология была отмечена только в 4–14% случаев и, в основном, у особей, находившихся на завершающих стадиях генеративного цикла. Вакуолизация ооцитов не коррелировала ни с одним из рассмотренных факторов. По всей видимости, в данном случае вакуолизация ооцитов в гонадах после нереста является одной из стадий резорбции невыметанных половых клеток. Единственным исключением было обнаружение этой патологии у моллюска, найденного в районе Бугаза, гонады которого находились на начальных стадиях генеративного цикла (3 стадия). Мы предполагаем, что в данном случае вакуолизация ооцитов была проявлением геронтологических изменений, поскольку сопровождалась рядом других патологий – гемоцитозом и полнокровием жабр, а крупный размер раковины указывал на значительный возраст моллюска [35].

Эпителиальная атрофия ПЖ и дегенерация ПЖ у моллюсков может наблюдаться не только при загрязнении среды, но при снижении количества доступной пищи [32]. Возможно, эти патологии ПЖ, отмеченные только у моллюсков в районах, пострадавших от паводка, были обусловлены еще и снижением доступности пищевых объектов в сеestone из-за увеличения количества взвешенного неорганического материала.

Таким образом, проведенный анализ с высокой долей вероятности указывает на связь между содержанием Ni в ДО и увеличением частоты тяжелых гистопатологий, а также на присутствие естественных причин возникновения легких патологий, в частности, возможную связь возраста моллюсков и повышенного содержания в соединительной ткани ПЖ коричневых клеток.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 17-14-00382).

Авторы благодарят участников экспедиции Черное море-2014 Т.Д. Прохорову, С.В. Сухова, А.Б. Басина, А.К. Залоту и В.Л. Семина за помощь в сборе и первичной обработке проб, а также А.И. Азовского за консультации по статистической обработке данных. Эта работа была бы невозможна без всесторонней помощи начальника экспедиции Черное море-2014 А.Г. Зацепина, директора ЮО ИО РАН С.Б. Куклева, экипажа МНИС “Ашамба” и сотрудников дайв-центра “Ямайка” на Бугазской косе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев М.П., Гнеушев М.И., Готов Я.К. и др.* Справочник предельно допустимых концентраций вредных веществ в пищевых продуктах и среде обитания. М.: Госсанэпиднадзор, 1993. 142 с.
2. *Будько Д.Ф., Демина Л.Л., Алексеева Т.Н. и др.* Геохимические преобразования микроэлементного состава колонки донных отложений Белого моря // Геология морей и океанов: материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2015. Т. IV. С. 8–12.
3. *Гаевская А.В.* Паразиты, болезни и вредители мидий (*Mutilus, Mutilidae*). IX. Бактерии (*Bacteria*). Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 202 с.
4. “Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.1078–01”, утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 06.11.2001 г., с 1 июля 2002 г.
5. *Демина Л.Л., М.А. Левитан, Н.В. Политова.* О формах нахождения некоторых тяжелых металлов в донных осадках эстуарных зон рек Оби и Енисея (Карское море) // Геохимия. 2006. № 2. С. 212–226.
6. *Джаошвили Ш.В.* Роль речных наносов в динамике морских берегов // Изв. АН СССР. Сер. Географ. 1989. Т. 4. С. 92–97.
7. *Колочкина Г.А., Симакова У.В., Прохорова Т.Д.* Популяционная структура двустворчатого моллюска-вселенца *Anadara kagoshimensis* на Северо-Кавказском побережье Черного моря // Труды IV Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование”. М.: Феория, 2015. С. 157–161.
8. *Колочкина Г.А., Исмаилов А.Д.* Способ оценки экологического состояния прибрежных экосистем: пат. 2518227 Рос. Федерация // Бюл. 2014. № 16. 7 с.
9. *Колочкина Г.А.* Биомаркеры воздействия загрязнений на двустворчатых моллюсков Северо-Кавказского побережья Черного моря. Дис. ... канд. биол. наук.: 03.00.18. М. 2009. 119 с.
10. *Колочкина Г.А., Милютин Д.М.* Использование морфо-функционального анализа *Anadara sp. cf. Anadara inaequivalvis* (*Bivalvia*) в экологическом мониторинге // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 192–199.
11. *Коршенко А.Н., Панченко А.В., Любимцев А.Л. и др.* Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2010. 4. Черное море. Обнинск: Артифлекс, 2011. 41 с.
12. *Котельянец Е.А., Коновалов С.К.* Тяжелые металлы в донных отложениях Керченского пролива // Морск. гидрофиз. журн. 2012. № 4. С. 50–60.
13. *Крыленко В.В., Есин Н.В.* Загрязнение Геленджикской бухты ливневым стоком // Экология моря. 2001. № 58. С. 69–73.
14. *Милютин Д.М., Вилкова О.Ю.* Черноморские моллюски-вселенцы рапана и анадара: состояние популяций и динамика запасов // Рыбное хозяйство. 2006. № 4. С. 50–53.
15. *Митропольский А. Ю., Безбородов А. А., Овсяный Е.И.* Геохимия Черного моря. Киев: Наукова думка, 1982. 114 с.
16. *Ревков Н.К.* Особенности колонизации Чёрного моря недавним вселенцем – двустворчатым моллюском *Anadara kagoshimensis* (*Bivalvia: Arcidae*) // Морск. биологический журн. 2016. Т. 1. № 2. С. 3–17.
17. *Рухин Л.Б.* Основы литологии. Л.: Государственное научно-техническое изд-во нефтяной и горнотопливной литературы, 1961. 781 с.
18. *Ушева Л.Н., Ващенко М.А., Дуркина В.Б.* Гистопатология пищеварительной железы двустворчатого моллюска *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) из юго-западной части залива Петра Великого Японского моря // Биология моря. 2006. Т. 32. № 3. С. 197–203.
19. *Ушева Л.Н., Фролова Л.Т.* Морфофункциональные изменения пищеварительной железы у двустворчатого моллюска *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) в норме и при паразитарной инвазии трематодами // Биология моря. 2006. Т. 32. № 2. С. 115–124.
20. *Чикина М.В.* Макрозообентос рыхлых грунтов Северо-Кавказского побережья Черного моря:

- Пространственная структура и многолетняя динамика. Дис. ... канд. биол. наук: 03.00.18. М., 2009. 117 с.
21. *Amachree D., Moody A.J., Handy R.D.* Comparison of intermittent and continuous exposures to cadmium in the blue mussel, *Mytilus edulis*: accumulation and sub-lethal physiological effects // *Ecotoxicology and environmental safety*. 2013. V. 95. P.
 22. *Bower S.M., McGladdery S.E., Price I.M.* Synopsis of infectious diseases and parasites of commercially exploited shellfish // *Annual Review of Fish Diseases*. 1994. V. 4. P. 1–199.
 23. *Broom M.* The biology and culture of marine bivalve mollusks of the genus *Anadara*. International Center for Living Aquatic Resources Management, Manila, Philippines. 1985. 37 p.
 24. *Chan M.K., Othman R., Zubir D. et al.* Induction of a putative metallothionein gene in the blood cockle, *Anadara granosa*, exposed to cadmium // *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C*. 2002. V. 131. № 2. P. 123–132.
 25. *Chiancone E., Verzili D., Boffi A. et al.* A cooperative hemoglobin with directly communicating hemes. The Scapharca inaequivalvis homodimer // *Biophysical chemistry*. 1990. V. 37(1). P. 287–292.
 26. *Costa P.M., Carreira S., Costa M.H. et al.* Development of histopathological indices in a commercial marine bivalve (*Ruditapes decussatus*) to determine environmental quality // *Aquatic toxicology*. 2013. V. 126. P. 442–454.
 27. *Gati G., Pop C., Brudașcă F. et al.* The ecological risk of heavy metals in sediment from the Danube Delta // *Ecotoxicology*. 2016. V. 25(4). P. 688–696.
 28. *Haigler S.A.* A histochemical and cytological study of the “brown cells” found in “auricular pericardial gland” and other tissues of the oyster, *Crassostrea virginica* (Gmelin): Master’s thesis. University of Delaware, DE, USA, 1964.
 29. Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95Anon, 1980.
 30. *Newman M.C., Clements W.H.* Biochemistry of toxicants // *Ecotoxicology. A Comprehensive Treatment*. CRC, 2008. P. 23–41.
 31. *Oros A., Gomoiu M.T.* Comparative data on the accumulation of five heavy metals (cadmium, chromium, copper, nickel, lead) in some marine species (molluscs, fish) from the Romanian sector of the Black Sea // *Recherches Marines*. 2010. V. 39. P. 89–108.
 32. *Owen G.* Feeding and digestion in the Bivalvia // *Adv. Comp. Physiol. Biochem*. 1974. V. 5. P. 1–35.
 33. *Pentreath R.J.* The accumulation from water of ⁶⁵Zn, ⁵⁴Mn, ⁵⁸Co and ⁵⁹Fe by the mussel, *Mytilus edulis* // *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 1973. V. 53. № . 01. P. 127–143.
 34. *Revkov N., Abaza V., Dumitrache et al.* The state of zoobenthos. State of the Environment of the Black Sea (2001–2006/7). 2008. P. 224–271.
 35. *Sahin C., Emiral H., Okumus I. et al.* The benthic exotic species of the Black Sea: Blood Cockle (*Anadara inaequivalvis*, Bruguiere, 1789: Bivalve) and Rapa Whelk (*Rapana thomasiana*, Crosse, 1861: Mollusc) // *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 2009. V. 8.– № 2. – С. 240–245.
 36. *Sahin C., Düzgüneş E., Okumuş İ.* Seasonal variations in condition index and gonadal development of the introduced blood cockle *Anadara inaequivalvis* (Bruguiere, 1789) in the southeastern Black Sea coast // *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2006. V. 6(2). P. 155–163.
 37. *Sternlieb I.* Copper and zinc // *The liver: biology and pathobiology*. Second edition / Eds. Arias I.M. et al. New York: Raven Press, 1988. P. 525–533.
 38. *Sunila I.* Toxicity of copper and cadmium to *Mytilus edulis* L.(Bivalvia) in brackish water // *Annales Zoologici Fennici*. 1981. V. 18. P. 213–223.
 39. *Sunila I.* Copper- and cadmium-induced histological changes in the mantle of *Mytilus edulis* L. (Bivalvia) // *Limnologia (Berlin)*. 1984. V. 15 (2). P. 523–527.
 40. *Sunila I.* Histopathology of mussels (*Mytilus edulis* L.) from the Tvärminne area, the Gulf of Finland (Baltic Sea) // *Annales Zoologici Fennici*. 1987. V. 24. P. 55–69.
 41. *Tay K. L., Teh S. J., Doe K., et al.* Histopathologic and histochemical biomarker responses of Baltic clam, *Macoma balthica*, to contaminated Sydney Harbour sediment, Nova Scotia, Canada // *Environmental health perspectives*. 2003. V. 111.– № 3. P. 273.
 42. *Teh S. J., Clark S. L., Brown C. L. et al.* Enzymatic and histopathologic biomarkers as indicators of contaminant exposure and effect in Asian clam (*Potamocorbula amurensis*) // *Biomarkers*. 1999. V. 4. № 6. P. 497–509.
 43. *Urrutia M.B., Ibarrola I., Iglesias J.I.P. et al.* Energetics of growth and reproduction in a high-tidal population of the clam *Ruditapes decussatus* from Urdaibai Estuary (Basque Country, N. Spain // *J. of Sea Res.* 1999. V. 42(1). P. 35–48.

Influence of the Bottom Sediment Characteristics on the Bivalve Mollusc *Anadara kagoshimensis* Histopathology's Variability in the North-Eastern Coast of the Black Sea

G. A. Kolyuchkina, D. F. Budko, V. K. Chasovnikov, V. P. Chzhu

With increasing anthropogenic impact on the environment, investigations of organism's response to the contamination of natural habitats, are especially relevant. In the present study, we sought to identify the correlation between the bottom sediments and local variability in histopathology of *Anadara kagoshimensis* (Bivalvia) in four sites of the north-eastern coast of the Black Sea. Bottom sediment grain size, redox potential of pore water, heavy metals, benzo- α -pyrene and DDT concentrations have been used as characteristics of bottom sediments. Analysis of the data revealed differences in the geochemical background of the studied sites and the histopathological state of the molluscs from these areas. Among the 10 studied elements as well as benzo- α -pyrene and DDT, only Ni has shown an exceedance of statutory limits of concentration in bottom sediments. The study reveals a relationship between Ni concentration in the bottom sediments and frequency of heavy histopathologies in the molluscs. In addition to causes directly related to pollution, mild pathology may be influenced by "natural" causes; in particular, the high content of brown cells in the connective tissue of the digestive gland may be due to the age of molluscs.