

УДК 563.96:550.42

Л.С. ДОЛМАТОВА, Е.Н. СЛИНЬКО, Л.Ф. КОЛОСОВА

## Особенности накопления тяжелых металлов в тканях двух цветных форм голотурии *Eupentacta fraudatrix* в летне-осенний период

Исследована вариабельность концентраций Cd, Cu, Zn, Fe, Mn с июля по сентябрь 2016 г. в стенке тела, кишке и гонадах двух цветных форм (с розовой и оранжевой окраской покровов тела) голотурии *Eupentacta fraudatrix*. Установлены достоверные колебания уровней большинства металлов в течение периода наблюдения, связанные, по-видимому, с нерестовой активностью и различающиеся в зависимости от органа и цвета голотурии. Отмечена большая защищенность оранжевой формы голотурии от возможного токсичного действия кадмия по сравнению с розовой формой, а также ее большая обеспеченность эссенциальными металлами в период нереста и по его окончании.

Ключевые слова: голотурии, тяжелые металлы, временные изменения.

**The features of heavy metal accumulation in tissues of the two color variants of a sea cucumber *Eupentacta fraudatrix* in summer-autumn period.** L.S. DOLMATOVA, E.N. SLINKO, L.F. KOLOSOVA (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

Variations in contents of Cd, Cu, Zn, Fe, Mn in body wall, gut and gonads of the two color variants (pink and orange) of a sea cucumber *Eupentacta fraudatrix* were studied in July–September 2016. Most metals changed their levels during the observation period apparently in relation to *Eupentacta fraudatrix* spawning. The contents of metals varied dependently on the organ and color of a sea cucumber. Orange form of a sea cucumber was shown to be more protected against possible toxic effects of Cd compared to that of the pink form. Orange individuals were also able to maintain the level of essential metals at the appropriate level during spawning and to accumulate these metals in post-spawning period more effectively compared to the pink form.

Key words: sea cucumbers, heavy metals, temporal variations.

Голотурия *Eupentacta fraudatrix* (D'yakonov & Baranova in D'yakonov et al., 1958) – обычный обитатель шельфа Японского моря. Ее ткани содержат биологически активные вещества с выраженными противогрибковыми и бактериостатическими эффектами [2]. В бухте Алексеева (зал. Петра Великого, Японское море) этот вид представлен двумя цветными формами – с розовым и оранжевым цветом покровов тела, для которых ранее было показано различие в средних размерах тела и скорости роста [2]. Наличие цветных вариантов окраски покровов тела описано и у таких видов голотурий, как *Apostichopus japonicus* (зеленый, черный, красный цвета) [7, 15] и *Cladolabes schmelzii* (серый, черный, желто-оранжевый, коричнево-оранжевый) [4, 16]. Повышение содержания тяжелых металлов (ТМ) в морской воде и донных осадках при наблюдаемом в последнее время увеличении антропогенной нагрузки может сопровождаться их аккумуляцией в тканях морских гидробионтов. При этом описанная у голотурий [2, 4, 7, 15] и моллюсков

\*ДОЛМАТОВА Людмила Степановна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, СЛИНЬКО Елена Николаевна – научный сотрудник, КОЛОСОВА Людмила Федоровна – ведущий инженер (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). \*E-mail: dolmatova@poi.dvo.ru

[14] цветовая дифференцировка может сопровождаться различиями не только в скорости роста [2, 14, 15], но и в метаболизме и накоплении тяжелых металлов с соответствующей разницей в устойчивости к стрессовым факторам [14]. Ранее показано, что содержание ТМ в тканях и органах у голотурий меняется в зависимости от сезона [18, 19], и эти изменения являются видо- и органоспецифичными [13, 19]. Однако особенности аккумуляции ТМ в тканях разных цветных форм голотурий оставались неисследованными.

Цель работы – выяснение различий в накоплении ТМ тканями двух цветных форм *E. fraudatrix* в летне-осенний период.

## Материалы и методы

Сбор голотурий *E. fraudatrix* с использованием легководолазного снаряжения производили в июле, августе и сентябре 2016 г. в бухте Алексеева (зал. Петра Великого, Японское море) на двух станциях на глубинах 0,5–0,8 м (станция 1) и 1,5–2 м (станция 2), являющихся местами поселения преимущественно розовых и оранжевых форм голотурии соответственно (см. рисунок).



Схема расположения исследуемых станций в бухте Алексеева (зал. Петра Великого, Японское море)

В исследуемые периоды отбирали по 10–11 экземпляров каждой цветной формы голотурии с длиной тела 3,5–5,5 см. Выделяли стенку тела, кишечник и гонады. Для анализа содержания тяжелых металлов объединяли органы не менее чем от трех животных. Высушивание тканей и минерализацию проводили по работе [10], определение ТМ (Cd, Cu, Zn, Fe и Mn) – методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на спектрофотометре Shimadzu 6800 (Япония).

Гонадный индекс (ГИ) определяли как процентное отношение массы гонады к массе тела голотурии после удаления целомической жидкости. Для каждого определения использовали 20 животных.

Для статистического анализа использовали GraphPad InStat, v. 3.01 (GraphPad Software, USA). Достоверность различий между группами оценивали с помощью *t*-теста Стьюдента с поправкой Уэлча. Разницу считали достоверной при  $P < 0,05$ .

## Результаты и обсуждение

Результаты определения концентрации тяжелых металлов в органах голотурии *E. fraudatrix* представлены в таблице.

**Распределение тяжелых металлов по органам  
у двух цветных форм голотурии *E. fraudatrix* в летне-осенний период**

Орган	Месяц наблюдений	Цветная форма	Концентрация тяжелых металлов, мкг/г сухой массы				
			Cd	Cu	Zn	Fe	Mn
Стенка тела	Июль	P	0,22 ± 0,03	0,68 ± 0,02	18,50 ± 0,35	32,80 ± 1,25	27,63 ± 0,41
		O	0,24 ± 0,01	0,65 ± 0,01	17,85 ± 0,17	34,54 ± 1,32	29,60 ± 0,75
	Август	P	0,25 ± 0,02	0,57 ± 0,01*	15,75 ± 0,75*	41,50 ± 2,12*	24,63 ± 0,92
		O	0,25 ± 0,02	0,57 ± 0,01*	17,20 ± 0,75	47,10 ± 2,86*	17,38 ± 0,53**
	Сентябрь	P	0,21 ± 0,01	0,67 ± 0,02	22,90 ± 1,05*	76,50 ± 7,62**	24,89 ± 0,47
		O	0,36 ± 0,04*	1,00 ± 0,03***	20,33 ± 0,20*	53,50 ± 2,36**	29,10 ± 0,62
Кишка	Июль	P	1,95 ± 0,19	6,60 ± 0,18	124,99 ± 9,90	111,65 ± 12,14	2,71 ± 0,18
		O	1,85 ± 0,05	6,31 ± 0,12	124,13 ± 17,01	122,58 ± 11,74	2,71 ± 0,23
	Август	P	4,28 ± 0,24***	11,80 ± 0,12***	136,19 ± 11,08	917,26 ± 63,19***	29,42 ± 2,86**
		O	1,03 ± 0,08***	11,80 ± 0,16***	95,23 ± 7,75	1389,3 ± 212,2***	24,91 ± 3,27**
	Сентябрь	P	1,25 ± 0,12*	1,65 ± 0,03***	121,04 ± 10,54	293,36 ± 18,52**	20,85 ± 1,51***
		O	1,67 ± 0,08	9,84 ± 0,11*	108,91 ± 8,96	144,51 ± 8,93	3,71 ± 0,21**
Гонада	Июль	P	0,67 ± 0,01	2,80 ± 0,20	63,16 ± 0,21	59,22 ± 2,09	1,72 ± 0,08
		O	0,60 ± 0,04	2,80 ± 0,09	65,18 ± 2,21	57,09 ± 2,31	1,76 ± 0,10
	Август	P	0,69 ± 0,01	2,64 ± 0,12	62,32 ± 0,14	48,34 ± 1,84*	0,99 ± 0,07**
		O	0,55 ± 0,03	2,91 ± 0,10	60,71 ± 1,11	52,04 ± 1,83	0,78 ± 0,05**
	Сентябрь	P	0,64 ± 0,01	2,44 ± 0,15	60,37 ± 0,15	63,47 ± 3,56	4,48 ± 0,28***
		O	0,88 ± 0,05*	5,03 ± 0,17***	107,43 ± 5,10**	182,44 ± 19,08**	3,96 ± 0,24***

\* $P < 0,05$ , \*\* $P < 0,01$ , \*\*\* $P < 0,001$  по сравнению с июлем.

Примечание. P – розовая, O – оранжевая формы.

Кадмий – один из наиболее токсичных для животных элементов [17]. В июле не было выявлено достоверных различий между содержанием этого металла в органах двух цветных форм голотурии. Концентрация кадмия снижалась в ряду кишка > гонада > стенка тела. Обнаружение максимальной концентрации кадмия в кишке соответствует представлениям о том, что морские беспозвоночные аккумулируют ТМ в основном из пищи, при этом кишка секвестрирует ТМ, снижая их уровень в жизненно необходимых органах [8]. В дальнейший период наблюдений (август–сентябрь) у розовой формы голотурии содержание кадмия в стенке тела и гонадах практически не менялось. Однако оно значительно (в 2,2 раза) возрастало в кишке в августе, а в сентябре снижалось по сравнению с уровнем июля. У оранжевой формы голотурии уровень кадмия в гонадах и стенке тела не менялся в августе по сравнению с июлем, но возрастал в сентябре (на 47 и 50 % соответственно), а в кишке он даже снижался в августе на 44 % и возвращался к уровню июля в сентябре.

Медь, хотя и является одним из важнейших эссенциальных металлов, будучи кофактором большого числа ферментов, в том числе антиоксидантного фермента супероксиддисмутазы (СОД), при определенных условиях может быть высокотоксичной и стимулировать перекисное окисление биомолекул [20]. В данном исследовании в июле концентрация меди, как и кадмия, имела близкие величины в отдельных органах у обеих цветных форм голотурии и снижалась в следующем порядке: кишка > гонада > стенка тела. В августе

уровень меди в стенке тела снижался на 11 и 12 %, но возрастал в кишке на 79 и 87 % у розовых и оранжевых экземпляров соответственно. В гонадах обеих форм он в этот период практически не изменялся. В сентябре уровень меди в стенке тела у розовых экземпляров возвращался к июльскому значению, а у оранжевых возрастал в 1,4 раза. В кишке у розовой формы голотурии концентрация меди в сентябре снижалась в 4 раза, а у оранжевой, напротив, возрастала в 1,6 раза по сравнению с июльскими значениями. В гонадах у розовых особей содержание меди оставалось на уровне июльского значения, а у оранжевых возрастало на 80 %.

Цинк – также эссенциальный металл, являющийся кофактором многих ферментов, в том числе антиоксидантных, и поддерживающий репродуктивную функцию [20]. В июле уровень цинка имел сходные значения в различных органах у обеих форм голотурии и снижался в последовательности кишка > гонада > стенка тела. В стенке тела розовых экземпляров в августе концентрация цинка достоверно снижалась на 15 %, а в сентябре, напротив, возрастала на 24 % по сравнению с уровнем в июле. При этом не отмечено ее изменений в кишке и гонадах в августе и сентябре по сравнению с июльскими величинами. У оранжевых голотурий концентрация цинка достоверно возрастала по сравнению с июльскими значениями в стенке тела (на 38 %) и в гонадах (на 65 %) в сентябре, но не в августе. В кишке, напротив, в сентябре отмечена тенденция к ее снижению на 23 %.

Железо, являясь эссенциальным металлом, участвует, в частности, в работе антиоксидантных ферментов, но в избыточном количестве проявляет токсичные свойства [20]. Концентрация железа в органах обеих цветных форм голотурии снижалась в следующем ряду: кишка > гонада > стенка тела. У розовых голотурий уровень железа значительно возрастал в стенке тела в августе и достигал максимального значения (в 2,4 раза превышающего июльскую величину) в сентябре, а в кишке уже в августе в 8,3 раза превышал июльское значение, в сентябре снижаясь до уровня, превышающего июльский в 2,6 раза. В гонадах концентрация железа в августе снижалась на 19 %, а в сентябре возвращалась к июльской величине. У оранжевых экземпляров повышение уровня железа по сравнению с его величиной в июле отмечено в стенке тела уже в августе (в 1,4 раза), а максимальное значение, в 1,6 раза превосходящее июльское, – в сентябре. Как и у розовых особей, концентрация железа в кишке у оранжевых голотурий значительно (в 11,4 раза) возрастала в августе, но в сентябре снижалась и не отличалась от таковой в июле. Значительный рост уровня железа, в отличие от такового у розовой формы, происходил в сентябре в гонадах (в 3,2 раза выше июльской величины).

Концентрация марганца, также являющегося эссенциальным элементом, необходимым, в частности, для работы митохондриальной СОД [20], имела у двух цветных форм голотурии близкие значения в отдельных органах. Однако распределение марганца по органам отличалось от распределения других металлов и снижалось у обеих цветных форм голотурий в следующем ряду: стенка тела > кишка > гонада. У розовых экземпляров уровень марганца в августе–сентябре не менялся в стенке тела, но возрастал в кишке в 10,8 раз по сравнению с июльским. В гонадах же отмечено достоверное снижение концентрации марганца в августе (в 1,7 раза) и ее увеличение в сентябре (в 2,6 раза). У оранжевых особей достоверное снижение в 1,7 раза уровня марганца в стенке тела отмечено в августе, а в сентябре он возвращался к июльским значениям. В кишке, как и у розовых экземпляров, происходил значительный (в 9,2 раза) рост концентрации металла в августе, но в сентябре происходило ее снижение до уровня, только на 38 % превышающего июльский. Изменения в гонаде имели тот же характер, что и у розовых экземпляров: снижение концентрации марганца в августе по сравнению с июлем в 2,3 раза и рост в сентябре на ту же величину.

Таким образом, уровень большинства металлов, кроме марганца, у обеих цветных форм голотурии изменялся в ряду кишка > гонада > стенка тела. Максимальное же содержание марганца в стенке тела, по-видимому, связано с его важной ролью в построении соединительной ткани и нормализации работы мышц [20]. При этом в течение летне-осеннего

сезона в содержании металлов в тканях голотурий происходили значительные колебания, характер которых различался в зависимости от органа и цвета особи. Асинхронность сезонных изменений в различных органах голотурий была показана ранее [19], и это позволило авторам предположить, что сезонные изменения в аккумуляции металлов в большей степени зависят от физиологических факторов, нежели от изменений в окружающей среде.

Нерест у морских организмов – период высокого физиологического напряжения. Результаты многолетних наблюдений за изменениями гонадного индекса у *E. fraudatrix* в бухте Алексева свидетельствуют о том, что нерест голотурии обычно начинается в июле, с прогревом морской воды до 19–21 °С, и заканчивается в августе – начале сентября [2] в соответствии с данными о сроках нереста *E. fraudatrix*, полученными ранее [5]. Эти данные также подтверждаются измерениями ГИ. Показано, что в июле ГИ у обеих форм голотурии был достаточно высок:  $33,2 \pm 4,2$  % и  $38,1 \pm 4,6$  % у розовых и оранжевых голотурий соответственно, что может свидетельствовать об их готовности к нересту [1]. В августе ГИ составил  $38,0 \pm 6,3$  % и  $48,2 \pm 6,5$  % у розовых и оранжевых голотурий соответственно. Однако в сентябре он значительно снизился – до  $18,2 \pm 2,4$  % у розовых особей и  $20,6 \pm 2,9$  % у оранжевых, что, по-видимому, свидетельствует об окончании нерестового периода. Таким образом, токсичное действие ТМ, прежде всего кадмия, может быть особенно опасно для голотурий в июле–августе.

Вместе с тем известно, что морские беспозвоночные могут защищаться от токсичного действия металлов, обеспечивая функционирование жизненно важных органов, прежде всего репродуктивной системы, даже в условиях высокого загрязнения. При этом используются различные механизмы элиминации, экскреции и секвестрации [12].

Анализ накопления ТМ в органах двух цветных форм голотурии *E. fraudatrix* показывает, что в июле содержание практически всех металлов в стенке тела, кишке и гонадах достоверно не различалось между исследованными формами. Поскольку на биоаккумуляцию металлов может влиять ряд экологических и физиологических факторов [6], близость этих факторов для двух цветных форм голотурии может определять сходство в накоплении ими ТМ. Два исследованных биотопа расположены близко друг к другу и имеют небольшую разницу в глубинах, на которых обитают две формы голотурии. Исследование влияния фактора глубины на разницу в содержании ТМ у *Holothuria tubulosa*, проведенное ранее [19], показало, что относительно большая разница в глубинах (10–15 м) могла оказывать влияние на уровень ТМ в тканях, но степень влияния варьировала для разных металлов и зависела от исследуемого органа. В наименьшей степени разница в глубинах влияла на содержание эссенциальных металлов – меди, цинка и железа. Отсутствие достоверной разницы между концентрациями всех исследованных металлов, включая кадмий, в разных органах двух цветных форм *E. fraudatrix* в июле подтверждает, что фактор глубины в настоящем исследовании не оказывал существенного влияния. В свою очередь, сходство в физиологической активности двух цветных форм голотурии, по-видимому, определяется близким уровнем готовности к началу нереста, о чем свидетельствуют сходные значения их ГИ.

При этом в период массового нереста голотурии в накоплении ТМ в различных ее органах происходили существенные изменения, характер которых зависел от измеряемого металла и мог варьировать у разных цветных форм. Так, в стенке тела как оранжевых, так и розовых экземпляров в августе значительно возросла концентрация железа, но снижалось содержание меди. Кроме того, у розовых особей значительно снижался уровень цинка, а у оранжевых – марганца. Содержание кадмия практически не менялось. Сезонные изменения содержания железа и меди (но не цинка) отмечены ранее в стенке тела *H. tubulosa*, однако у этой голотурии изменялся и уровень кадмия [19]. Разница между сезонной вариабельностью кадмия у *E. fraudatrix* и *H. tubulosa* может быть связана как с различиями в периодах исследования, так и с видовыми особенностями, значение которых подчеркнуто в работе [18].

Таким образом, в стенке тела *E. fraudatrix* в августе имела место вариабельность эссенциальных элементов, но не кадмия. Сезонное снижение уровня эссенциальных металлов, отмечаемое и в мягких тканях моллюсков, объясняется именно связью с нерестовой активностью [6]. При этом у моллюсков снижение уровней ТМ происходит как за счет эффекта «тканевого разбавления» (снижение концентрации за счет увеличения массы), так и за счет выноса металлов с половыми продуктами. Можно предполагать, что снижение уровня меди в стенке тела обеих цветных форм голотурии *E. fraudatrix* в настоящем исследовании может быть связано с обоими этими факторами. Однако обращает на себя внимание тот факт, что между оранжевыми и розовыми голотуриями имелись различия в накоплении в стенке тела цинка и марганца в августе: уровень первого снижался только у розовых, второго – только у оранжевых голотурий. При этом снижение у оранжевых особей уровня марганца, содержание которого было особенно велико именно в стенке тела голотурии, по-видимому, связано с более быстрым накоплением ими массы в летний период по сравнению с розовыми голотуриями, что показано нами ранее [2]. В свою очередь, снижение уровня цинка в стенке тела у розовой формы голотурий может быть связано с более интенсивным расходом этого металла у розовых экземпляров по сравнению с оранжевыми вследствие физиологических особенностей. Возможно, снижение уровня эссенциальных металлов в стенке тела может быть связано и с их перераспределением в целомическую жидкость, в которой ТМ могут аккумулироваться в наибольшем количестве по сравнению с другими исследованными тканями, как это показано у *H. tubulosa* [19]. Известно, что эссенциальные металлы необходимы для работы антиоксидантных ферментов, а также для иммунной защиты организмов [20]; ранее получены данные о значительном росте активности антиоксидантных ферментов в целомической жидкости *E. fraudatrix* в период нереста (июль–август) [3].

Однако в сентябре в стенке тела розовых особей концентрация меди возвращалась к июльскому значению, а уровни цинка и железа даже превосходили июльские величины. У оранжевых голотурий, в отличие от розовых, повышались по сравнению с июльскими значениями не только уровни железа и цинка, но и уровни меди и кадмия, при этом концентрация марганца возвращалась к июльскому уровню. Подобный рост уровня ТМ при наступлении осеннего периода покоя описан у дальневосточных видов голотурий, а также (по окончании нерестового периода) у моллюсков [6, 12].

В кишке у обеих цветных форм голотурий в августе концентрация цинка практически не изменялась, а уровни железа, меди и марганца значительно возросли по сравнению с июльскими величинами. При этом в кишке у розовых голотурий отмечен достоверный рост уровня кадмия, а у оранжевых экземпляров – его достоверное снижение. Последний факт свидетельствует о том, что оранжевые голотурии могут регулировать уровень токсичного кадмия.

В сентябре в кишке у розовых голотурий снижались по сравнению с июльскими значениями уровни кадмия и меди, однако возрастали концентрации железа и марганца. У оранжевых уровни кадмия и железа возвращались к июльским значениям, но оставались повышенными концентрации меди и марганца.

В гонадах розовых экземпляров в августе уровни меди, цинка и кадмия достоверно не изменялись, а концентрации железа и, особенно, марганца даже снижались. У оранжевой формы происходило только снижение концентрации марганца. Таким образом, у обеих цветных форм голотурий увеличение уровня металлов в кишке не сопровождалось возрастанием их концентрации в гонадах и в стенке тела.

Необходимо отметить, что в августе у оранжевых голотурий, в отличие от розовых, отмечено отсутствие снижения концентрации цинка в стенке тела и железа в гонадах, что, по-видимому, свидетельствует об их большей обеспеченности этими элементами, необходимыми для функционирования организма в данный период. В основе такой разницы между двумя цветными формами может быть снижение у оранжевых голотурий востребованности металлов для функционирования антиоксидантной ферментной защиты в связи

с более высоким уровнем в их тканях, по сравнению с тканями розовой формы, неферментных антиоксидантов, предположительно, каротиноидов. Каротиноиды морских беспозвоночных считаются основными пигментами, обеспечивающими ярко-оранжевую окраску их тела, и обладают высокой антиоксидантной активностью, предотвращая повреждение клеточных мембран активными формами кислорода [9, 11]. Исследования, проведенные на моллюсках, показали, что каротиноиды снижают токсичность меди, таким образом, аккумуляция каротиноидов может давать преимущества при выживании вида в загрязненных ТМ акваториях [11].

Заслуживает внимания и тот факт, что у обеих цветных форм поддерживалась стабильность концентрации кадмия в гонадах, даже при значительном росте его уровня в кишке, как это показано у розовой формы. У оранжевых особей снижение концентрации кадмия отмечено даже в кишке. Это указывает на способность голотурий обеих цветных форм регулировать содержание кадмия в гонадах возможно, с участием каротиноидов.

В сентябре в гонадах розовых голотурий содержание исследованных металлов было на уровне июльских значений, кроме марганца, концентрация которого значительно возросла по сравнению с июльской величиной. У оранжевых голотурий значительно повысилась концентрация всех исследованных металлов. Следовательно, восстановление уровня и накопление эссенциальных металлов в гонадах, кишке и стенке тела у оранжевых голотурий проходили более эффективно, чем у розовых.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о различиях в динамике накопления металлов в отдельных органах *E. fraudatrix* в летне-осеннем периоде (что, по-видимому, связано с нерестовой активностью животных), а также в аккумуляции металлов между двумя цветными формами голотурии. Большая защищенность оранжевой формы от возможного токсичного действия кадмия, а также ее большая обеспеченность эссенциальными металлами по сравнению с розовыми особями в период нереста могут говорить о наличии у нее преимуществ при поселении в загрязненных тяжелыми металлами акваториях и при воздействии стрессовых факторов среды.

Полученные данные могут быть использованы при разработке технологий аквакультуры этих животных, а также при выборе оптимальных сроков их сбора с фармакологическими целями для обеспечения максимальной безопасности здоровья человека.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анциферова А.В. Особенности репродуктивной биологии голотурии *Cucumaria frondosa* Баренцева моря в осенне-зимний период // Докл. Моск. о-ва испытателей природы. 2006. Т. 39. С. 25–28.
2. Долматова Л.С. Межгодовые различия в скорости роста голотурии *Eupentacta fraudatrix* в зависимости от температуры среды // Региональные проблемы. 2016. № 4. С. 46–50.
3. Долматова Л.С., Заика О.А. Сезонные изменения активности антиоксидантных ферментов в целомической жидкости голотурий *Eupentacta fraudatrix* в бухте Алексеева (залив Петра Великого) // Современное состояние водных биоресурсов и экосистем морских и пресных вод: проблемы и пути решения: материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения Г.В. Никольского. Ростов н/Д: АЗНИИРХ, 2010. С. 138–141.
4. Каменев Я.О. Ультраструктура внутренних органов, бесполое размножение и регенерация у голотурии *Cladolabes schmeltzii*: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, 2013. 24 с.
5. Крючкова Г.А. Краткий определитель личинок морских ежей, офиур и голотурий залива Петра Великого Японского моря. Препр. № 22. Владивосток: ИБМ ДВНЦ АН СССР, 1987. 56 с.
6. Павловская В.В. Сезонные изменения содержания тяжелых металлов в мягких тканях *Dreissena polymorpha* // Вестн. РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2008. № 2. С. 93–97.
7. Селин Н.И., Черняев М.Ж. Особенности распределения, состав поселений и рост дальневосточного трепанга в заливе Восток Японского моря // Биология моря. 1994. № 1. С. 73–81.
8. Arun Kumar K., Achyuthan H. Heavy metal accumulation in certain marine animals along the East Coast of Chennai, Tamil Nadu, India // J. Environ. Biol. Vol. 28. P. 637–643.
9. Bandaranayake W.M. The nature and role of pigments of marine invertebrates // Nat. Prod. Rep. 2006. Vol. 23. P. 223–255.
10. Belcheva N.N., Zakhartsev M., Silina A.V. et al. Relationship between shell weight and cadmium content in digestive gland of Japanese scallop *Patinopecten yessoensis* (Jay) // Mar. Environ. Res. 2006. Vol. 61. P. 396–409.

11. Caramujo M.J., Carvalho C.C. de, Silva S.J., Carman K.R. Dietary carotenoids regulate astaxanthin content of copepods and modulate their susceptibility to UV light and copper toxicity // *Mar. Drugs*. 2012. Vol. 10. P. 998–1018.
12. Chiarelli R., Roccheri M.C. Marine invertebrates as bioindicators of heavy metal pollution // *Open J. Metal*. 2014. Vol. 4. P. 93–106.
13. Dolmatova L., Zaika O., Slinko E., Kolosova L. Antioxidant enzyme defense and heavy metal accumulation in tissues of holothurians *Apostichopus japonicus* and *Eupentacta fraudatrix*: characteristics of body-length dependences during spring-summer period // *Pac. Oceanogr.* 2010. Vol. 5. P. 96–105.
14. Hao Z., Yang L., Zhan Y. et al. Biochemical components of different colored strains of cultured Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) under different cultivation systems // *Isr. J. Aquacult.* 2015. P. 8.
15. Kan-no M., Kijima A. Genetic differentiation among three color variants of Japanese sea cucumber *Stichopus japonicus* // *Fish. Sci.* 2003. Vol. 69. P. 806–812.
16. Massin C. Reef dwelling holothurians (Echinodermata) of the Spermonde Archipelago (South-West Sulawesi, Indonesia) // *Zool. Verhand.* 1999. Vol. 329. P. 1–144.
17. Shenai-Tirodkar P.S., Gauns M.U., Ansari Z.A. Concentrations of heavy metals in commercially important oysters from Goa, Central-West coast of India // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2016. Vol. 97. P. 813–819.
18. Tunca E., Aydın M., Şahin Ü. Interactions and accumulation differences of metal(loid)s in three sea cucumber species collected from the Northern Mediterranean Sea // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2016. Vol. 23. P. 21020–21031.
19. Warnau M., Dutrieux S., Ledent G. et al. Heavy metals in the sea cucumber *Holothuria tubulosa* (Echinodermata) from the Mediterranean Posidonia oceanica ecosystem: body compartment, seasonal, geographical and bathymetric variations // *Environ. Bioindic.* 2006. Vol. 1. P. 1–18.
20. Yatoo M.I., Saxena A., Deepa P.M. et al. Role of trace elements in animals: a review // *Vet. World*. 2013. Vol. 6, N 12. P. 963–967.