

## ВНУТРИПОПУЛЯЦИОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЦИСТ *ARTEMIA PARTHENOGENETICA* BARIGOZZI, 1974 (BRANCHIOPODA, ANOSTRACA) ЗАЛИВА КАРА-БОГАЗ-ГОЛ КАСПИЙСКОГО МОРЯ (БИОМЕТРИЯ)

© 2025 г. С. А. Булатов<sup>1,2,\*,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Международный институт моделирования и прогнозирования развития морских и гипергалинных экосистем, Клин, Россия;

<sup>2</sup>Консорциум “Международный альянс комплексных исследований морских и гипергалинных экосистем”, Клин, Россия

\* e-mail: mimge\_rus@mail.ru

\*\* e-mail: mimge2020@gmail.com

Поступила в редакцию 15.09.2024 г.

После доработки 11.11.2024 г.

Принята к публикации 18.12.2024 г.

Проанализированы морфометрические показатели цист (покоящихся яиц) партеногенетической популяции галофильного рака артемии, относящейся к полиморфному виду *Artemia parthenogenetica*, отобранных в акватории залива Кара-Богаз-Гол Каспийского моря. Установлена значительная внутрипопуляционная изменчивость толщины хориона цист, а также несущественная – в отношении диаметра гидратированных цист и эмбрионов. Показано, что между соленостью и исследованными биометрическими признаками имеется достоверная положительная связь. Значительная вариабельность диаметра гидратированных цист и толщины хориона делает данные морфологические признаки непригодными для идентификации данной популяции; меньший средний диаметр эмбриона является признаком, отличающим карабогазгольскую популяцию рака от других партеногенетических популяций артемии. Расширен в большую сторону диапазон известных для партеногенетических популяций *Artemia* значений толщины хориона цист.

**Ключевые слова:** Каспийское море, залив Кара-Богаз-Гол, *Artemia parthenogenetica*, диаметр цист, толщина хориона, соленость, внутрипопуляционная изменчивость

DOI: 10.31857/S0030157425040087

### ВВЕДЕНИЕ

Род *Artemia* (Branchiopoda: Artemiidae) представлен космополитными раками, населяющими прибрежные морские лагуны, внутренние соленые озера и солеварни [13, 23, 32]. Он включает в себя комплекс видов и надвидов, определяемых критериями [17]. В настоящее время известно девять раздельнополых видов рода [16, 23, 25], а также большое количество облигатных партеногенетических линий с различными уровнями пloidности [22, 23, 25]. Артемия способна выживать при солености от 15 до 300 г/л [22].

Залив Кара-Богаз-Гол – крупнейший в мире гипер-ультрагалинный водоем, расположенный в восточной части Каспийского моря на территории Туркменистана [3]. Длина залива по меридиану 165 км и параллели 154 км в координатах 40°35'–41°50' с.ш. и 50°40'–52°30' в.д. [3].

По данным сайта HYDROWEB, LEGOS (<https://hydroweb.theia-land.fr>), площадь поверхности Кара-Богаз-Гола в различные периоды изменялась от 19200 км<sup>2</sup> (август 1996 г.) до 16600 км<sup>2</sup> (октябрь 2023 г.) (рис. 1).

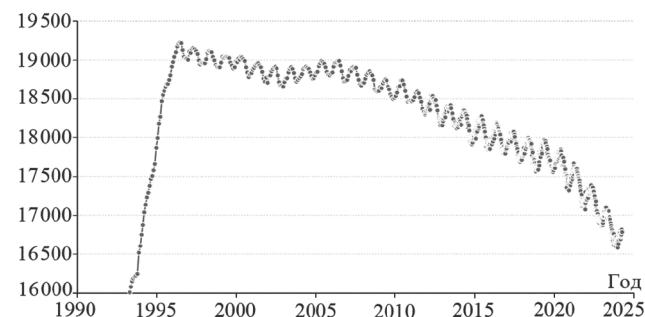


Рис. 1. Изменение площади залива Кара-Богаз-Гол по данным HYDROWEB, LEGOS (Франция) с 1993 по 2024 гг., в км<sup>2</sup> (на 16 апреля 2024 г.).

Соленость в разных частях залива колеблется от 40 до 270 г/л, однако за последние 100 лет она достигала 300 г/л [4]. Минимальные и максимальные глубины в Кара-Богаз-Голе составляют от 2.2 до 6.2 м [3].

В зависимости от условий окружающей среды, *Artemia* способна размножаться живорождением, производя свободно плавающих личинок – науплиусов, либо откладыванием яиц двух типов – с тонкой и толстой оболочкой (цист) [3, 23, 24, 27]. Цисты (покоящиеся яйца) артемии используются в качестве живого стартового корма в условиях аквакультуры при разведении креветок и ценных видов рыб [19, 28, 34]. Повышенный спрос на цисты артемии в мире в первую очередь обусловлен продолжающимся ростом производства продукции мировой аквакультуры, которое по состоянию на 2022 год составило 130.9 млн т в живом весе, а в денежном выражении – 312.8 млрд долл. США [10]. Мировое производство цист *Artemia* составляет около 4000 тонн в год [18]. Основные запасы цист сосредоточены в водоемах США, Китая, России, Казахстана и Узбекистана, которые в настоящее время являются одними из главных поставщиков цист на мировых рынках. В последнее время, отмечается сокращение числа основных промысловых артемиевых водоемов [33], а также снижение объемов поставок цист из водоемов России и Узбекистана, в связи с чем возникает необходимость возобновления освоения природных источников цист, в которых ранее популяция рака находилась в угнетенном состоянии по причине ухудшения гидрологических условий водоемов [4]. Начиная с 2000 г. в Кара-Богаз-Голе по причине увеличения солености среды произошло резкое сокращение маточного поголовья популяции артемии, в связи с чем в 2023 г. для возрождения промысла цист был предложен для реализации комплекс мероприятий, направленных на улучшение гидрологического и экологического режимов уникальной экосистемы [4].

Установлено, что в заливе Кара-Богаз-Гол популяция рака представлена одними самками и, являясь партеногенетической, относится специалистами к полиморфному виду *Artemia parthenogenetica* Barigozzi, 1974 [3, 4]. Начиная с середины 1990-х гг., мировому рынку были представлены различные виды и расы артемии, среди которых доминировали разнообразные партеногенетические популяции из залива Кара-Богаз-Гол, озер Юго-Западной Сибири, континентального и прибрежного Китая [7]. Однако, цисты указанных партеногенетических

популяций по некоторым характеристикам (биометрия цист, особенности диапаузы, цвет хориона, требования к декапсуляции и др.) отличаются от *Artemia* из Большого соленого озера (США) – “стандарта” в аквакультурной практике. Такие параметры, как биометрия цист, задействованы в характеристике штамма, определяющей его рыночную стоимость [27]. Начиная с 2004 г. было указано на необходимость идентификации коммерческих образцов цист [7]. В современной литературе содержатся сведения о внутри- и межпопуляционных различиях морфометрических характеристик цист (диаметр цист, диаметр зародыша и толщина хориона) партеногенетических популяций артемии из соленых водоемов Западной Сибири [9] и Аральского моря [30], позволяющих идентифицировать такие популяции, либо указывающие на нестабильность этих признаков в одной популяции в разные годы. Однако отсутствуют данные о внутрипопуляционных различиях биометрических характеристик цист партеногенетической популяции рака из залива Кара-Богаз-Гол.

Целью настоящей работы явилось изучение внутрипопуляционной изменчивости морфометрических характеристик цист (диаметр гидратированных цист, диаметр декапсулированных цист (эмбрионов) и толщина хориона) *A. parthenogenetica* залива Кара-Богаз-Гол с последующей проверкой возможной идентификации изученных цист, путем сравнения полученных нами данных с цистами других известных партеногенетических популяций рака.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для настоящих исследований было использовано 10 образцов цист партеногенетической популяции артемии, отобранных с 7 прибрежных станций в акватории залива Кара-Богаз-Гол в сентябре 1998 г., январе, феврале, марте и августе 1999 г., августе 2000 г. и марте 2011 г. (рис. 2, табл. 1).

Береговые образцы в заливе отбирались в 100–150 м от берега при помощи планктонной сети, с квадратным отверстием 50×50 см и размером ячей 100 мкм. Сборщик проходил 100 шагов (1 шаг ≈ 50 см) и процеживал 12.5 м<sup>3</sup> воды при каждом взятии проб. Собранный материал сливали в пластиковые емкости объемом 1 л. Соленость воды в местах отбора проб измеряли рефрактометром ATAGO (Япония).

Диаметр гидратированных цист и диаметр декапсулированных цист (эмбрионов) измеряли

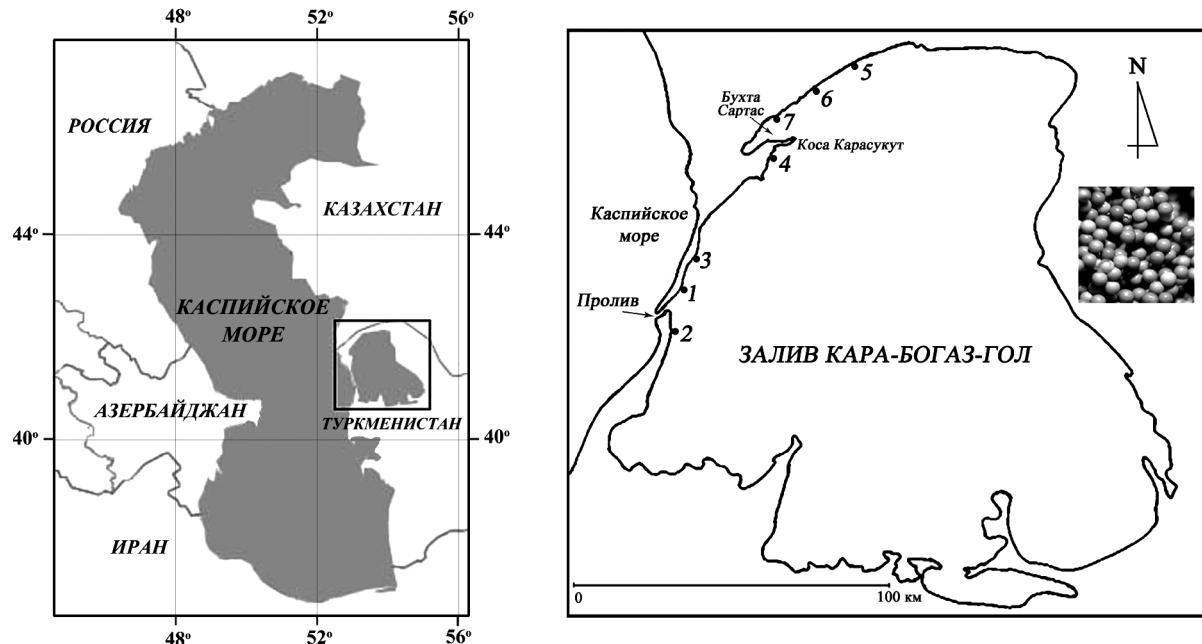


Рис. 2. Карта-схема залива Кара-Богаз-Гол с распределением станций отбора образцов цист *Artemia* по его акватории.

**Таблица 1.** Координаты, местоположение станций и дата отбора гидробиологических образцов в акватории залива Кара-Богаз-Гол

Образец, номер	Станция, номер	Местонахождение	Дата	Координаты		Соленость, г/л
				Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	
1	1	Зона смешения вод	27.08.2000	41°06'43"	52°54'32"	51
2	2	10 км южнее пролива	03.09.1998	41°04'41"	52°55'42"	174
3	3	15 км севернее пролива	11.01.1999	41°13'49"	52°51'13"	220
4			29.03.2011			256
5	4	Коса Каракасукут	27.02.1999	41°32'51"	52°52'13"	220
6			09.08.1999			257
7	5	Северная точка 1	27.02.1999	42°00'26"	52°58'33"	240
8	6	Северная точка 2	30.03.1999	41°52'29"	52°51'54"	260
9						
10	7	Бухта Сартас	01.07.1998	41°46'22"	52°46'53"	244
			27.02.1999			232

с помощью микроскопа марки Levenhuk D740T (США), при увеличении 40×, оборудованного окуляр-микрометром с измерительной линейкой.

Для определения толщины хориона сначала измеряли диаметр гидратированных цист, затем проводили декапсулирование цист по стандартной методике [23]. Толщину хориона цист определяли по следующей формуле [27, 31]:

$$Ch = (U - D)/2,$$

где  $Ch$  – толщина хориона,  $U$  – диаметр гидратированной цисты,  $D$  – диаметр эмбриона. Выборка – 100 цист из каждого образца.

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакетов программ MS Excel 2019 и Statistica 12. Образцы цист, отобранные в разное время из различных районов акватории залива Кара-Богаз-Гол, анализировали с целью выявления популяционной изменчивости, используя основные статистические характеристики количественной изменчивости: минимальное ( $min$ ) и максимальное ( $max$ ) значения признаков, среднюю арифметическую ( $M$ ), ошибку средней арифметической ( $m$ ), коэффициент вариации ( $CV, \%$ ), стандартное отклонение ( $SD$ ). Рассчитывали коэффициент корреляции ( $r_{xy}$ ) между

сolenостью мест отбора образцов цист и биометрическими показателями цист. Достоверность различий выборок оценивали по *t*-критерию Стьюдента, при уровне значимости  $P \leq 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Биометрия цист.** В исследованных образцах абсолютные значения диаметра гидратированных цист находились в пределах от 226.0 до 288.6 мкм, в среднем – 255.0 мкм (табл. 2). Наибольший средний диаметр гидратированных цист зарегистрирован в образцах 8 ( $265.4 \pm 0.8$  мкм) и 4 ( $265.1 \pm 1.0$  мкм). Несколько меньшего размера были гидратированные цисты в образцах 3, 5, 7 и  $10 - 260.9 \pm 1.0$  мкм,  $259.9 \pm 0.9$  мкм,  $259.6 \pm 1.0$  мкм и  $258.5 \pm 0.9$  мкм, соответственно. Самые мелкие цисты выявлены в образцах 1 ( $234.4 \pm 0.8$  мкм) и 9 ( $248.1 \pm 1.5$  мкм).

Абсолютные значения диаметра декапсулированных цист (эмбрионов) находились в пределах 209.7–277.5 мкм (табл. 2). Наиболее крупные декапсулированные цисты зарегистрированы в образцах 8 (243.5 мкм), 4 (243.4 мкм) и 3 (242.5 мкм), эмбрионы средних размеров – в образцах 5–7, 9–10 (236.5–240.8 мкм), самые мелкие – на станции 1 (228.7 мкм).

В исследованной карабогазгольской популяции рака значения толщины хориона цист находились в пределах от 0.7 (образец 6) до 27.7 мкм (образец 5). Сравнение средней толщины хориона по всем исследованным образцам показало, что наиболее тонкий хорион наблюдался у цист со станции 1 ( $5.7 \pm 0.2$  мкм), а наиболее толстый хорион – у цист в образцах 5, 9, 8 и 10 ( $11.5 \pm 0.6$  мкм,  $11.1 \pm 0.6$  мкм,  $10.9 \pm 0.6$  мкм и  $10.9 \pm 0.7$  мкм, соответственно). Цисты из образцов 2, 3 и 6 характеризовались промежуточными значениями толщины хориона –  $8.9 \pm 0.4$  мкм,  $9.0 \pm 0.7$  мкм и  $9.7 \pm 0.5$  мкм, соответственно (табл. 2).

Внутрипопуляционные исследования показали, что из трех исследованных признаков (диаметр гидратированных цист, диаметр эмбрионов и толщина хориона) в разные годы в условиях флюктуации солености в заливе от 51 до 260 г/л наиболее изменчивым является толщина хориона цист ( $CV = 52.9\%$ ), наименее вариабельными – диаметр гидратированных цист ( $CV = 4.3\%$ ) и диаметр декапсулированных цист ( $CV = 4.4\%$ ).

Анализ достоверности внутрипопуляционных различий морфометрических показателей, представленный в таблице 3, показал следующее. В отношении диаметра гидратированных цист отмечено отсутствие достоверных различий

**Таблица 2.** Размах колебаний значений морфометрических параметров цист артемии залива Кара-Богаз-Гол, мкм ( $n = 100$ )

Образцы	<i>M</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>SD</i>	<i>CV, %</i>	<i>m</i>
Диаметр гидратированных цист						
1	234.4	226.0	247.0	7.7	3.3	0.8
2	250.0	232.0	265.0	14.8	5.9	1.5
3	260.9	227.6	283.1	10.2	3.9	1.0
4	265.1	238.7	288.6	9.5	3.6	1.0
5	259.9	233.1	288.4	9.8	3.8	0.9
6	248.2	227.0	265.0	14.3	5.8	1.4
7	259.6	233.4	277.5	10.0	3.9	1.0
8	265.4	238.7	288.6	8.4	3.2	0.8
9	248.1	228.7	266.7	15.3	6.2	1.5
10	258.5	238.7	277.5	9.9	3.8	0.9
В среднем:	255.0	232.4	274.7	11.0	4.3	1.1
Диаметр эмбрионов						
1	228.7	218.1	243.5	7.9	3.5	0.8
2	241.1	216.5	262.7	15.0	6.2	1.5
3	242.5	222.0	260.9	9.2	3.8	0.9
4	243.4	216.5	260.9	7.4	3.0	0.7
5	237.0	210.9	266.4	8.9	3.8	0.9
6	238.5	210.6	265.0	15.0	6.3	1.5
7	240.8	216.5	266.2	8.0	3.3	0.8
8	243.5	222.1	277.5	8.6	3.5	0.9
9	237.0	209.7	262.3	15.7	6.6	1.6
10	236.5	210.9	260.9	9.4	4.0	0.9
В среднем:	238.9	215.4	262.6	10.5	4.4	1.1
Толщина хориона						
1	5.7	3.5	7.9	1.6	27.5	0.2
2	8.9	2.3	15.5	4.1	46.2	0.4
3	9.0	11.1	22.2	6.8	75.9	0.7
4	10.5	8.3	17.0	5.5	52.1	0.6
5	11.5	8.3	27.7	6.5	56.8	0.6
6	9.7	0.7	16.4	4.9	50.9	0.5
7	10.6	2.8	25.0	5.3	49.9	0.5
8	10.9	8.3	23.2	6.2	56.6	0.6
9	11.1	4.4	25.2	5.7	51.2	0.6
10	10.9	5.6	24.9	6.7	61.8	0.7
В среднем:	9.9	5.5	20.5	5.3	52.9	0.5

*Примечание.* *M* – среднее арифметическое, в мкм; *min* – минимальное значение признака, в мкм; *max* – максимальное значение признака, в мкм; *SD* – стандартное отклонение; *CV* – коэффициент вариации, в % и *m* – ошибка среднего арифметического.

**Таблица 3.** Оценка достоверности внутрипопуляционных различий морфометрических параметров цист артемии залива Кара-Богаз-Гол по значению  $t$ -критерия Стьюдента ( $n = 100$ )

Образцы	Образцы								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диаметр гидратированных цист									
2	<b>9.4*</b>								
3	<b>20.8*</b>	<b>6.1*</b>							
4	<b>25.1*</b>	<b>8.6*</b>	<b>3.0*</b>						
5	<b>20.4*</b>	<b>5.5*</b>	0.8	<b>3.9*</b>					
6	<b>8.5*</b>	0.9	<b>7.3*</b>	<b>9.8*</b>	<b>6.7*</b>				
7	<b>20.0*</b>	<b>5.4*</b>	0.9	<b>4.0*</b>	0.2	<b>6.5*</b>			
8	<b>27.2*</b>	<b>9.0*</b>	<b>3.4*</b>	0.2	<b>4.3*</b>	<b>10.4*</b>	<b>4.4*</b>		
9	<b>8.1*</b>	0.9	<b>7.0*</b>	<b>9.5*</b>	<b>6.5*</b>	0.03	<b>6.3*</b>	<b>9.9*</b>	
10	<b>19.3*</b>	<b>4.8*</b>	1.7	<b>4.9*</b>	1.0	<b>5.9*</b>	0.8	<b>5.4*</b>	<b>5.7*</b>
Диаметр эмбрионов									
2	<b>7.4*</b>								
3	<b>11.4*</b>	0.8							
4	<b>13.6*</b>	1.4	0.8						
5	<b>7.0*</b>	<b>2.4*</b>	<b>4.3*</b>	<b>5.5*</b>					
6	1.4	1.2	<b>2.3*</b>	<b>2.9*</b>	0.9				
7	<b>10.8*</b>	0.2	1.4	<b>2.4*</b>	<b>3.2*</b>	1.3			
8	<b>12.7*</b>	1.4	0.8	0.2	<b>5.3*</b>	<b>2.3*</b>	<b>2.4*</b>		
9	<b>4.7*</b>	1.9	<b>3.0*</b>	<b>3.7*</b>	0.01	0.7	<b>2.1*</b>	<b>3.7*</b>	
10	<b>6.4*</b>	<b>2.6*</b>	<b>4.5*</b>	<b>5.7*</b>	0.3	1.1	<b>3.4*</b>	<b>5.5*</b>	0.3
Толщина хориона									
2	<b>7.3*</b>								
3	<b>4.7*</b>	0.01							
4	<b>8.4*</b>	<b>2.3*</b>	1.8						
5	<b>8.6*</b>	<b>3.3*</b>	<b>2.7*</b>	1.2					
6	<b>7.7*</b>	1.2	0.9	1.1	<b>2.2*</b>				
7	<b>8.8*</b>	<b>2.4*</b>	1.9	0.1	1.1	1.2			
8	<b>8.2*</b>	<b>2.7*</b>	<b>2.2*</b>	0.5	0.6	1.6	0.5		
9	<b>9.2*</b>	<b>3.1*</b>	<b>2.5*</b>	0.8	0.4	1.9	0.7	0.2	
10	<b>7.5*</b>	<b>2.5*</b>	<b>2.0*</b>	0.5	0.6	1.5	0.4	0.03	0.3

\* – достоверные различия при  $P \leq 0.05$ .

при парных сопоставлениях: цист из образцов 2 и 6; образцов 2 и 9; образцов 3 и 5; образцов 3 и 7; образцов 3 и 10; образцов 4 и 8; образцов 5 и 7; образцов 5 и 10; образцов 6 и 9; образцов 7 и 9. В остальных случаях выявлены достоверные различия. В отношении диаметра декапсулированных цист необходимо отметить, что цисты из образца 1 достоверно отличаются от цист, содержащихся во всех остальных образцах, за исключением образца 6; цисты из образца 2 – от цист

из образцов 5 и 10; цисты из образца 3 – от цист из образцов 5–6, 9–10; цисты из образца 4 – от цист из образцов 5–7, 9–10; цисты из образца 5 – от цист из образцов 7–8; цисты из образца 6 – от цист из образца 8; цисты из образца 7 – от цист из образцов 8–10; цисты из образца 8 – от цист из образцов 9–10. В остальных случаях достоверные различия отсутствуют. В отношении толщины хориона, цисты со станции 1 достоверно отличаются от цист, выловленных на всех остальных

станциях; цисты из образца 2 – от цист из образцов 4–5, 7–10; цисты из образца 3 – от цист из образцов 5, 8–10; цисты из образца 5 – от цист из образца 6. Во всех остальных случаях достоверные различия не выявлены.

Таким образом, в заливе отмечено максимальное внутрипопуляционное различие диаметров гидратированных цист и эмбрионов, для 77.8 и 62.3% сравниваемых пар средних по образцам, соответственно; минимальное – в отношении параметра толщины хориона (55.6% сравниваемых пар средних по образцам).

**Влияние солености.** Известно, что соленость оказывает существенное влияние на рост и размножение *Artemia* в естественной среде, поэтому

была выяснена степень влияния солености раствора (ультрагалинной среды обитания) залива Кара-Бога-Гол на изученные морфометрические признаки цист рачка.

На рисунках 3–5 показана зависимость морфометрических параметров цист от солености. Корреляционный анализ показал наличие сильной положительной связи солености с диаметром гидратированных цист ( $r_{xy} = 0.77; p = 0.01$ ), диаметром декапсулированных цист ( $r_{xy} = 0.76; p = 0.01$ ) и толщиной хориона ( $r_{xy} = 0.89; p = 0.0006$ ).

Полученные результаты показывают, что с увеличением солености в условиях залива Кара-Богаз-Гол происходит увеличение размеров всех трех изученных параметров морфологии цист.

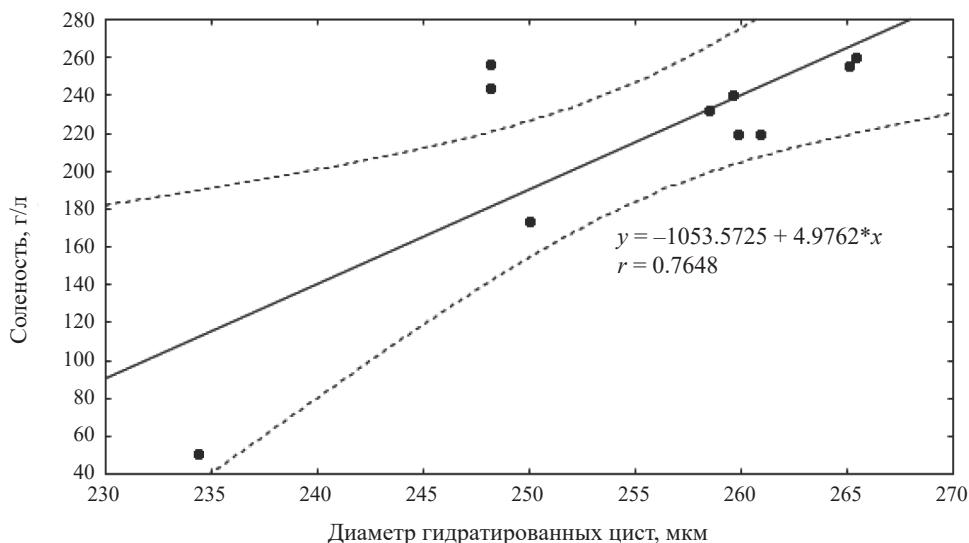


Рис. 3. Взаимосвязь и коэффициент корреляции ( $r_{xy}$ ) между диаметром гидратированных цист и соленостью среды залива Кара-Богаз-Гол ( $n = 10$ ).

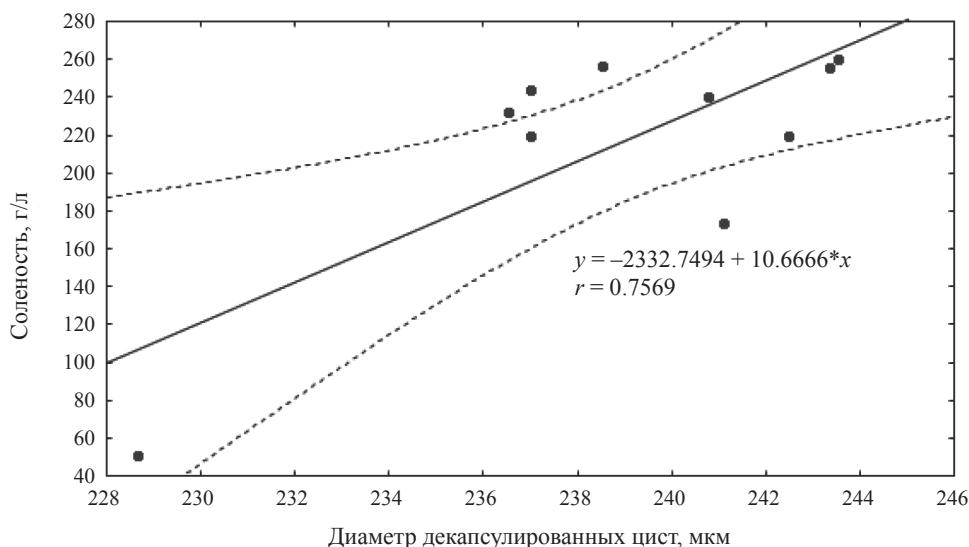


Рис. 4. Взаимосвязь и коэффициент корреляции ( $r_{xy}$ ) между диаметром декапсулированных цист и соленостью среды залива Кара-Богаз-Гол ( $n = 10$ ).

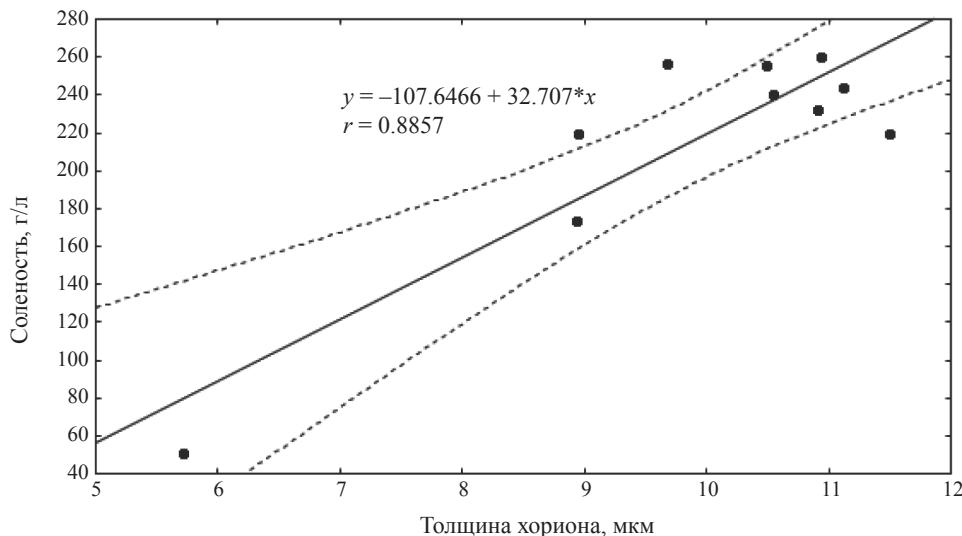


Рис. 5. Взаимосвязь и коэффициент корреляции ( $r_{xy}$ ) между толщиной хориона цист и соленостью среды залива Кара-Богаз-Гол ( $n = 10$ ).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Биометрические параметры покоящихся стадий рачка *Artemia*, включая диаметры гидратированных и декапсулированных цист, а также толщину хориона, могут рассматриваться как хорошие инструменты для характеристики популяций артемии [15]. Первое всестороннее исследование вариаций размеров цист, проведенное бельгийскими учеными в 1980 г. [31], позволило разделить все цисты на три группы: мелкие цисты, большие цисты и цисты промежуточных размеров. Было документально подтверждено [31], что самые крупные цисты характерны для партеногенетических популяций рачка (259.6–284.9 мкм). Последующие исследования позволили установить наличие всех трех размерных групп у партеногенетических популяций. Абсолютные значения диаметров гидратированных цист партеногенетических популяций артемии в гипергалинных озерах Западной Сибири колеблются в пределах 210.0–330.0 мкм, в среднем  $266.0 \pm 0.7$  мкм, декапсулированных цист – 196.0–294.0 и 245.0 мкм [9], в Аральском море – от 210.0 до 310.0, в среднем  $270.6 \pm 3.1$  мкм и 198.0–297.0, в среднем  $242.9 \pm 3.4$  мкм, соответственно [30], в индийских солеварнях – 217.0–289.0 мкм, в среднем – 244.9 мкм, и 196.0–267.0, в среднем – 228.1 мкм, соответственно [21]. В соленных водоемах Крыма для партеногенетических диплоидных популяций *Artemia* средние значения диаметра цист составляют 245.0 мкм, для триплоидных – 278.0 мкм [1]. Изучение 11 иранских популяций рачка [12], показало, что средние размеры гидратированных и декапсулированных цист партеногенетических

популяций могут достигать больших значений (285.4 и 267.0 мкм, соответственно). Исследование цист партеногенетической популяции артемии озера Аккокколь (Китай) позволило обнаружить гидратированные и декапсулированные цисты самых больших размеров –  $325.4 \pm 13.7$  мкм и  $301.4 \pm 14.2$  мкм, соответственно [15]. Все это может свидетельствовать о возможной генетической неоднородности партеногенетических популяций *Artemia*. Литвиненко и др. [9], ссылаясь на работу калмыцких ученых, сообщают о еще более крупных цистах для *A. parthenogenetica* в водоемах Большое Яшалтинское и Джама (Калмыкия) – от 225.0 до 370.0 мкм, в среднем  $300.0 \pm 30$  мкм. Однако, данный размерный ряд не нашел своего подтверждения, по причине отсутствия таких сведений в первоисточнике [6]. Наши исследования показали, что по размерам гидратированных цист (от 226.0 до 288.6 мкм) партеногенетическая популяция артемии из залива Кара-Богаз-Гол не отличается от цист, происходящих из всех вышеуказанных местообитаний, за исключением китайского озера Аккокколь. В свою очередь, по среднему диаметру декапсулированных цист она уступает сибирским, аральским и иранским партеногенетическим популяциям рачка, монофилитичным по отношению к популяции из Кара-Богаз-Гола [2, 26]. Таким образом, меньший средний диаметр эмбрионов из залива может служить признаком, отличающим карабогазгольскую популяцию артемии от других близкородственных популяций.

Считается, что биометрическое разнообразие цист партеногенетических популяций рачка зависит от уровней полидности популяций [31].

G. Triantaphyllidis с соавторами ([29]), изучив цисты партеногенетической популяции *Artemia* с острова Мадагаскар (с комплексом триплоидных хромосом) и из Намибии (с комплексом диплоидных хромосом), установили, что диаметры гидратированных и декапсулированных цист мадагаскарской артемии были больше ( $258.9 \pm 11.6$  мкм и  $246.9 \pm 11.7$  мкм), чем у намибийских цист ( $246.7 \pm 11.0$  мкм и  $233.1 \pm 9.8$  мкм). Популяция ракка с комплексом пентаплоидных хромосом из солеварни Инэхай (Китай) обладала гидратированными цистами и эмбрионами большего размера ( $295.4 \pm 14.7$  мкм и  $271.1 \pm 13.1$  мкм), чем цисты популяции из китайского озера Хох (с комплексом тетраплоидных хромосом), со средними диаметрами  $278.6 \pm 14.0$  мкм и  $264.8 \pm 12.1$  мкм, соответственно [15]. Исходя из размеров цист, которые указаны в таблице 2, можно предположить, что в заливе Кара-Богаз-Гол обитают диплоидные (образцы 1–2, 6 и 9) и триплоидные (образцы 3–5, 7–8 и 10), а возможно и тетраплоидные популяции *Artemia* (образцы 3–5 и 8). Необходимы дальнейшие исследования в этом направлении, в том числе для того, чтобы понять причины разной пloidности особей карабогазгольской популяции и влияния пloidности раков на их морфологию.

Для карабогазгольских цист выявлена значительная внутрипопуляционная изменчивость в разные сезоны и годы. Так, при сравнении с более ранними литературными данными, разница в диаметре цист оказалась еще больше, чем в данном анализе. Согласно ранее опубликованным сведениям [11], в июне и октябре 1999 г. и сентябре 2000 г. в заливе Кара-Богаз-Гол основу популяции составляли цисты со средним диаметром 238.0 мкм, т.е. в среднем в 1.07 раза меньше, чем зафиксировано нами в настоящем анализе (255.0 мкм). В образце 4, полученном нами из залива в 2011 г. со станции 3 были выявлены цисты с самым большим средним диаметром – 265.1 мкм. Такая разница может быть обусловлена влиянием солености на варьирование размеров цист в одной популяции в различные периоды года или годы, что не опровергается результатами проведенного нами корреляционного анализа (рис. 3 и 4).

Известно, что толщина хориона не всегда зависит от диаметра цист, встречаются популяции, как имеющие малый диаметр и толстый хорион [9], так и больший диаметр и тонкий хорион [12, 15]. В основном толщина хориона находится в диапазоне от 4.7 до 11.2 мкм [31], однако, имеются популяции с меньшей и большей средней толщиной

хориона: 3.4–13.6 мкм – в водоемах Ирана [12]; 3.5–12.2 мкм – в соленных водоемах Китая [15]; 6.6–12.4 мкм – в озерах Западной Сибири [9]; 0.6–8.6 мкм – в водоемах Турции [20]. Полученные нами абсолютные (0.7–27.7 мкм) и средние (5.7–11.5 мкм) значения расширяют диапазон известных для партеногенетических популяций ракка значений толщины хориона в большую сторону, что, по всей видимости, объясняется более суровыми условиями жизни карабогазгольской артемии. Сравнение полученных нами данных показывает, что толщина хориона в отдельных образцах может существенно меняться, в том числе за счет цист, приносимых в более соленые северные и южные районы залива из менее соленой приусыевой части водоема с помощью поверхностных течений от пролива, возникающих под действием стока каспийских вод [8]. Так, внутрипопуляционная изменчивость толщины оболочки цист из образца 7 при солености 240 г/л имела размах колебаний от 2.8 до 25.0 мкм, из образца 9 при солености 244 г/л – от 4.4 до 25.2 мкм и из образца 10 при солености 232 г/л – 5.6–24.9 мкм, соответственно. В других образцах колебания толщины хориона оказались не столь значительными. Полученные данные указывают на слабую закрепленность признака за популяцией, что, по всей видимости, вызвано влиянием природных факторов. Аналогичная особенность отмечалась в исследованиях с сибирскими [9] и иранскими [14] популяциями ракка. Так, для популяций *Artemia* озер Северо-Казахстанской области, у которых средняя толщина хориона колебалась от 4.0 до 8.4 мкм при диаметре цист 279.0–307.0 мкм, отмечено, что с увеличением солености происходит уменьшение толщины хориона [5]. Для цист ракка из водоемов Западной Сибири исследователи отмечали незначительное увеличение толщины хориона при повышении солености [9]. Настоящие исследования показывают, что в условиях Кара-Богаз-Гола между толщиной хориона и соленостью присутствует сильная положительная связь.

## ВЫВОДЫ

- Настоящие исследования показали, что цисты артемии залива Кара-Богаз-Гол, в условиях изменения солености от 54 до 260 г/л, характеризуются значительной внутрипопуляционной изменчивостью толщины хориона и несущественной – в отношении диаметров гидратированных цист и эмбрионов.

- Оценка достоверности внутрипопуляционных различий трех исследованных признаков

(диаметр гидратированных цист, диаметр декапсулированных цист и толщина хориона) показала максимальное различие диаметров гидратированных цист и эмбрионов, наименьшее – толщины хориона.

3. Между соленостью и диаметром гидратированных цист, диаметром эмбрионов и толщиной хориона отмечена положительная достоверная связь.

4. Значительная вариабельность двух исследованных признаков цист (диаметр гидратированных цист и толщина хориона) рачка партеногенетической популяции Кара-Богаз-Гола свидетельствует о том, что данные биометрические характеристики не могут служить надежными показателями, идентифицирующими данную популяцию.

5. Меньший диаметр эмбриона популяции карабогазгольской *Artemia* может служить признаком, отличающим ее от других близкородственных партеногенетических популяций рачка.

6. Полученные нами данные позволили расширить диапазон известных для партеногенетических популяций артемии значений толщины хориона цист в большую сторону.

**Финансирование работы.** Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Международного института моделирования и прогнозирования развития морских и гипергалинных экосистем. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

**Соблюдение этических стандартов.** В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

**Конфликт интересов.** Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ануфриева Е.В. Ракообразные гиперсоленых водоемов Крыма: фауна, экология, распространение: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.10. Севастополь, 2014. 175 с.
2. Бойко Е.Г., Капустина Я.А. Популяционно-генетические исследования галофильного рачка *Artemia* как наиболее перспективного живого корма для рыб // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2007. № 2 (170). С. 76–81.
3. Булатов С.А. Современное состояние залива Карабогаз-Гол (Каспийское море). Бо-Бассен: Глобэдит, 2019. 210 с.
4. Булатов С.А. Перспективы промышленного освоения запасов цист рачка *Artemia parthenogenetica* Barigozzi, 1974 (Branchiopoda, Anostraca) залива Кара-Богаз-Гол (Каспийское море) // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2023. Т. 17. № 6 (209). С. 356–366.
5. Вольф Л.А. Экологические особенности жаброно-гого рачка (*Artemia parthenogenetica* Barigozzi, 1974) в соленых водоемах Северного Казахстана (Республика Казахстан): дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. Павлодар, 2010. 157 с.
6. Иванова В.И., Концева Г.Н., Бакташева Н.М. Влияние экологических факторов на рост и продуктивность артемии в гипергалинных водоемах Калмыкии // Естественные науки. 2012. № 3 (40). С. 51–55.
7. Ксяюмей В., Катанья Ф., Думс Ф. и др. Идентификация коммерческих образцов цист галофильного рачка *Artemia* методом RFLP анализа митохондриальной р-ДНК // Биоразнообразие артемии в странах СНГ: современное состояние ее запасов и их использование: материалы международного научно-исследовательского семинара (Москва, 17–19 июля 2002 г.). М., 2004. С. 155–158.
8. Лепешков И.Н., Буйневич Д.В., Буйневич Н.А., Седельников Г.С. Перспективы использования солевых богатств Карабогаз-Гола. М.: Наука, 1981. 274 с.
9. Литвиненко Л.И., Куцанов К.В., Разова Л.Ф. и др. Внутри- и межпопуляционная изменчивость цист и взрослых стадий артемии (Branchiopoda: Anostraca) в сибирских популяциях (морфометрия) // Морской биологический журнал. 2021. Т. 6. № 2. С. 33–51.
10. ФАО. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры – 2024. “Голубая трансформация” в действии. Рим: ФАО, 2024. 264 с.
11. Шакирова Ф.М., Булатов С.А. Современное состояние популяции *Artemia salina* (L.) залива Карабогазгол и перспективы ее рационального использования // Tethys aqua zoological research. Т. 2. 2003. С. 61–72.
12. Abatzopoulos T.J., Agh N., Van Stappen G. et al. Artemia sites in Iran // Journal of the marine biological association of the UK. 2006. V. 86. № 2. P. 299–307.
13. Agh N., Van Stappen G., Bossier P. et al. Effect of salinity on survival, growth, reproductive and life span characteristics of *Artemia* populations from Urmia Lake and neighboring lagoons // Pakistan journal of biological sciences. 2008. V. 11. № 2. P. 164–172.
14. Asem A., Rastegar-Peyvani N., De Los Rios P. et al. Biometrical comparison of *Artemia urmiana* Günther, 1899 (Crustacea: Anostraca) cysts between rainy and drought years (1994–2003/4) from Urmia Lake, Iran // International journal of biological and life sciences. 2010. V. 6. № 2. P. 100–106.
15. Asem A., Sun S.-C. Biometric characterization of Chinese parthenogenetic *Artemia* (Crustacea: Anostraca) cysts, focusing on its relationship with ploidy and habitat altitude // North-Western journal of zoology. 2014. V. 10. № 1. P. 149–157.

16. Asem A., Yang C., Eimanifar A. et al. Phylogenetic analysis of problematic Asian species of *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea, Anostraca), with the descriptions of two new species // Journal of crustacean biology. 2023. V. 43. № 1. Ruad002.
17. Browne R.A., Bowen S.T. Taxonomy and population genetics of *Artemia*. In: *Artemia* biology / Browne R.A. et al. (Eds.). Boca Raton: CRC Press., 1991. P. 221–235.
18. Camara M.R. After the gold rush: a review of *Artemia* cyst production in northeastern Brazil // Aquaculture reports. 2020. V. 17. P. 1–6.
19. Eimanifar A., Van Stappen G., Marden B., Wink M. *Artemia* biodiversity in Asia with the focus on the phylogeography of the introduced American species *Artemia franciscana* Kellogg, 1906 // Molecular phylogenetics and evolution. 2014. V. 79. P. 392–403.
20. Eskandari A., Saygi Y. Ecological surveys on the parthenogenetic *Artemia* populations in the hypersaline lakes of Anatolia, Turkey // Turkish journal of zoology. 2019. V. 43. № 4. P. 367–378.
21. John C.J.A., Abatzopoulos T.J., Marian P.M. Characterization of a new parthenogenetic *Artemia* population from Thamaraikulam, India // Journal of biological research. 2004. V. 2. P. 63–74.
22. Li K., Zhang R., Sui L.-Y. et al. Genetic structure of ten *Artemia* population from China: cumulative effect of ancient geological events, climatic changes, and human activities // Frontiers in marine science. 2024. Vol. 11:1375641.
23. Manual on *Artemia* production and use. FAO Fisheries and aquaculture technical papers. № 702. / Van Stappen G. et al. (Eds.). Rome: FAO, 2024. 212 p.
24. Marden B., Brown P., Bosteels T. Great Salt Lake *Artemia*: Ecosystem functions and services with a global reach. In: Great Salt Lake biology: A terminal lake in a time of change / Baxter B.K., Butler J.K. (Eds.). Cham: Springer, 2020. P. 175–237.
25. Pang H., Zheng K., Wang W. et al. The morphological differentiation and evolutionary origins of *Artemia* in China // Diversity. 2024. V. 16. № 144. P. 1–21.
26. Sainz-Escudero L., Lopez-Estrada E.K., Rodriguez-Flores P.C., Garcia-Paris M. Settling taxonomic and nomenclatural problems in brine shrimps, Crustacea: Branchiopoda: Anostraca), by integrating mitogenomics, marker discordances and nomenclature rules // PeerJ. 2021. 9: e10865. P. 1–62.
27. Sellami I., Naceur H.B., Kacem A. Study of cysts biometry and hatching percentage of the brine shrimp *Artemia salina* (Linnaeus, 1758) from the Sebkha of Sidi El Hani (Tunisia) according to successive generations // Aquaculture studies. 2020. V. 21. № 1. P. 41–46.
28. Sorgeloos P., Dhert P., Candreva P. Use of the brine shrimp, *Artemia* spp., in marine fish larviculture // Aquaculture. 2001. V. 200. P. 147–159.
29. Triantaphyllidis G.V., Abatzopoulos T.J., Miasa E., Sorgeloos P. International study on *Artemia*. LVI. Characterization of two *Artemia* populations from Namibia and Madagascar: cytogenetics, biometry, hatching characteristics and fatty acid profiles // Hydrobiologia. 1996. V. 335. P. 97–106.
30. Uteturatova F.J., Kim S.I., Kamilov B.G. et al. Biometrical study of artemia cysts harvested from the Aral Sea in Uzbekistan // Sustainable management of earth resources and biodiversity. 2022. V. 1068. P. 1–7.
31. Vanhaecke P., Sorgeloos P. International study on *Artemia* IV. The biometrics of *Artemia* strains from different geographical origin // The brine shrimp *Artemia*. Vol. 3. Ecology, culturing, use in aquaculture / Persoone G. et al. (Eds.). Wetteren: Universa Press., 1980. P. 393–405.
32. Vanhaecke P., Tackaert W., Sorgeloos P. The biogeography of *Artemia*: an updated review // *Artemia* research and its applications. Vol. 1 / Sorgeloos P. et al. (Eds.). Wetteren: Universa Press., 1987. P. 129–155.
33. Wurtsbaugh W.A., Miller C., Null S.E. et al. Decline of the world's saline lakes // Nature geoscience. 2017. V. 10. № 11. P. 816–821.
34. Wu X.-F., Shen C.-Y., Fu C.-Z. et al. Cyst size variability in invasive American *Artemia franciscana* Kellogg, 1906 (Branchiopoda, Anostraca) in Asia: a commercial approach // Crustaceana. 2022. V. 95. № 5–6. P. 573–584.

**INTRAPOPULATION VARIABILITY OF *ARTEMIA  
PARTHENOGENETICA* BARIGOZZI, 1974 (BRANCHIOPODA,  
ANOSTRACA) CYSTS OF THE KARA-BOGAZ-GOL BAY  
OF THE CASPIAN SEA (BIOMETRY)**

**S. A. Bulatov<sup>a, b, \*, \*\*</sup>**

*<sup>a</sup>International Institute for Modeling and Forecasting the Development of Marine  
and Hypersaline Ecosystems LLC, Klin, Russia*

*<sup>b</sup> International Alliance for Integrated Research of Marine and Hypersaline Ecosystems Consortium,  
Klin, Russia*

*\*e-mail: mimge\_rus@mail.ru*

*\*\*e-mail: mimge2020@gmail.com*

Cysts (resting stages) of the brine shrimp *Artemia* are used as live starter feed in aquaculture for breeding shrimp and valuable fish species. The data on cysts of *Artemia* parthenogenetic population – *Artemia parthenogenetica* (diameter of hydrated cysts, diameter of decapsulated cysts (embryos), and chorion thickness), sampled in the Kara-Bogaz-Gol Bay of the Caspian Sea, were analyzed. Significant intrapopulation variability in the cyst chorion thickness was established, as well as insignificant variability in the diameter of hydrated cysts and diameter embryos. The absolute values of the diameter of hydrated cysts were in the range of 226.0–288.6  $\mu\text{m}$ , the mean values for the samples – 234.0–265.4  $\mu\text{m}$ ; the absolute values of the diameter of decapsulated cysts were in the range of 209.7–277.5  $\mu\text{m}$ , the mean values for samples – 228.7–243.5  $\mu\text{m}$ ; the absolute values of the cyst chorion thickness were in the range of 0.7–27.7  $\mu\text{m}$ , the mean values for samples – 5.7–11.5  $\mu\text{m}$ . It is shown that there is a strong positive reliable relationship between salinity and the studied biometric features. Significant variability in the diameter of hydrated cysts and the chorion thickness indicates that these morphological features cannot serve as reliable indicators for identifying this population; a smaller mean embryo diameter is a feature that distinguishes the Kara-Bogaz-Gol population of *Artemia* from other parthenogenetic populations. The range of known values of the cyst chorion thickness of *Artemia* parthenogenetic populations has been expanded to the larger side.

**Keywords:** Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, *Artemia parthenogenetica*, cyst diameter, chorion thickness, salinity, intrapopulation variability