

ЗАГАЛЬНА ТА МОРСЬКА ГЕОЛОГІЯ

УДК (550.42:551.352):593.12 262.5

DOI: 10.18524/2303-9914.2018.2(33).146654

Т. О. Кондарюк, спеціаліст палеонтологічного музею ОНУ
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
ул. Дворянска, 2, Одеса, 65082, Україна
tanya_kondaruk@ukr.net

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ РАКОВИН БЕНТОСНЫХ ФОРАМИНИФЕР КАК ИНДИКАТОР СТРЕССА МОРСКОЙ СРЕДЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРЕСНОВОДНОГО СТОКА

В статье приведены результаты исследования латерального распределения морфологически измененных раковин бентосных фораминифер в донных осадках румынского шельфа Черного моря в связи с влиянием пресного стока Дуная. Проанализированы основные необходимые для жизни фораминифер параметры придонной морской среды. Описаны и классифицированы основные типы деформаций, характерных для района исследований, а также предпринята попытка выяснения закономерностей их приуроченности.

Ключевые слова: фораминиферы, морфологические деформации, Черное море, дельта Дуная, стрессовые условия.

ВВЕДЕНИЕ

Морфологические деформации раковин фораминифер известны с XIX столетия [9]. С тех пор количество работ, посвященных данному вопросу, неуклонно растет. Исследователи обращают внимание на наличие деформированных раковин в составе, как ископаемых, так и современных комплексов фораминифер [22, 1, 20, 5, 6, 11]. Отмечается, что деформации бывают различных типов, а их количественные и качественные показатели могут существенно варьировать [4, 27, 10, 17].

Причиной деформаций могут быть как механические повреждения, так и неблагоприятными воздействия окружающей среды – в обоих случаях, приводящих к патологическому морфогенезу раковин. Различить их довольно сложно, но возможно при помощи специфических методов исследований. Так, Янко В. В. с соавторами [25], используя флуоресценцию сульфлафина и хлоретрациклина, описали различия морфологических деформаций, вызванных обоими типами воздействия.

В качестве неблагоприятных воздействий окружающей среды на паталогический морфогенез раковин фораминифер называют изменение: температуры, солености [24], кислотности [14], содержания кислорода [2], количества пищевых ресурсов [18, 17], субстрата, освещенности и пр. [5, 26]. Имеются довольно многочисленные данные об увеличении количества деформированных раковин и разнообразия их типов, причем независимо от родовой принадлежности, в районах загрязнения моря тяжелыми металлами, бытовыми стоками, различными химикатами, жидкими углеводородами. Делаются попытки приурочить специфические типы деформаций к определенным типам загрязнения [16, 4, 26, 27, 15, 21].

Несмотря на возрастающее количество исследований, в том числе экспериментальных, консенсус в понимании главных причин паталогических изменений раковин до сих пор не достигнут. Тем не менее, их использование в качестве индикаторов состояния морских донных экосистем, находящихся под воздействием антропогенной нагрузки (стресса), на сегодняшний день является одним из приоритетных направлений экологической микропалеонтологии (environmental micropaleontology) [26].

Под стрессом зачастую понимается неспецифический ответ организма на любое предъявленное ему требование. При этом имеет значение лишь интенсивность потребности организма в перестройке или в адаптации, независимо от того благоприятной или неблагоприятной является экологическая обстановка [23].

Особое место занимают экспериментально-цитологические подходы к поиску причин, вызывающих морфологические изменения раковин. Одним из них является изучение реакции на стресс защитных механизмов фораминифер [7, 8]. Такие подходы позволяют лучше понять функционирование и адаптацию этих простейших в неблагоприятной экологической обстановке и, тем самым, осуществить мониторинг экосистем на ранних стадиях их загрязнения (Early Warning Monitoring). Экспериментально показано, что утолщение органической матрицы (lining) раковин фораминифер служит защитной реакцией организма на повышение концентрации свинца в морской среде и, таким образом, может быть использовано для мониторинга загрязнения этим химическим элементом [10].

Повышение численности и разнообразия деформированных раковин, наряду с уменьшением общей численности и количества видов фораминифер, имеет место при загрязнении морской среды кадмием [27] или медью [12]. При этом, раковины существенно уменьшаются в размерах и становятся тонкостенными, несмотря на то, что медь, как и другие микроэлементы, играют биологически важную роль в росте и жизни большинства морских организмов, однако, до определенного порога, выше которого она становится токсичной [27].

Исследования, в том числе экспериментальные, посвященные влиянию речного стока на раковины бентосных фораминифер, немногочисленны. По-ви-

димому, это связано с неоднозначностью понимания его последствий на метаболизм морских организмов. С одной стороны, речной сток участвует в формировании солевого баланса морей. С другой стороны, он повышает содержание органических веществ (а значит и пищи) в зонах разгрузки за счет стока с суши. В свою очередь, это приводит к снижению прозрачности воды, а значит ее освещенности, содержания растворенного кислорода и прочих параметров воды и донных осадков. Именно поэтому в местах впадения в моря крупных рек, таких как Дунай, например, формируются уникальные переходные или «стрессовые» условия для морских гидробионтов. Будучи исключительно морскими животными, фораминиферы не могут не реагировать на подобные условия среды, что выражается изменением их численностей, видовой разнообразия и патологическим морфогенезом раковин.

Данная работа является продолжением предыдущих исследований [28] которые позволили установить, что распределение количественных и качественных (таксономических) характеристик фораминифер на румынском шельфе Черного моря определяется тремя факторами, главный из которых глубина бассейна, которая проявляется опосредованно, в первую очередь, через влияние солёности придонной воды. Прегруппировка видового состава и увеличение количества видов с увеличением глубины, и солёности позволяет уверенно оконтуривать границы распространения речного стока и говорить о его неблагоприятном воздействии на морские экосистемы. Низкое видовое разнообразие фораминифер позволяет оконтурить районы с наиболее сильным влиянием пресных вод, а его повышенные значения, напротив, – уменьшение их влияния на донные экосистемы. В целом, сообщества фораминифер в их качественных и количественных характеристиках показывают себя уверенными показателями уровня стрессовости изучаемой территории в режиме реального масштаба времени.

Однако, неизвестно влияет ли речной сток на патологический морфогенез раковин фораминифер и можно ли использовать этот критерий в качестве индикатора стрессовых условий, создаваемых речным стоком, на морские экосистемы.

Целью настоящей работы является поиск дополнительного критерия, а именно морфологических деформаций раковин фораминифер, для определения стресса морских экосистем, находящихся под влиянием речного стока.

Рабочая гипотеза – речной сток влияет на нормальное функционирование цитоскелета фораминифер, вызывая деформации их раковин.

Объект исследования – морфологические деформации раковин фораминифер.

Предмет исследования – поиск корреляции между количественными и качественными показателями деформированных раковин фораминифер и влиянием речного стока (стресса) на морские экосистемы.

Для достижения цели поставлены следующие задачи: количественный

учет деформированных раковин фораминифер в пробах донных осадков; систематика морфологических деформаций у различных видов; корреляция морфологических деформаций раковин с параметрами среды в румынской части Черного моря, прилегающей к дельте Дуная.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район работ (рис. 1) охватывает южную (румынскую) часть северо-западного шельфа Черного моря, расположенную между дельтой Дуная и мысом Калиакра. На долю румынской части приходится 83,0% площади дельты (3446 км²) [19].

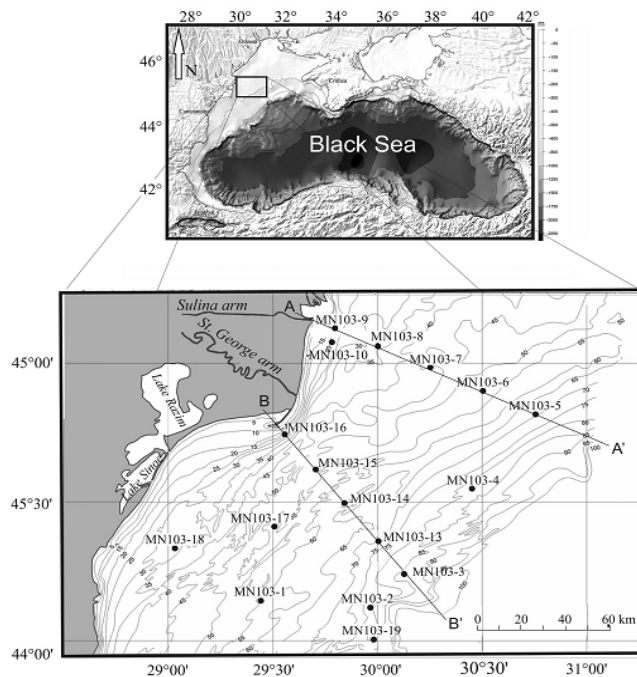


Рис. 1. Район исследования и расположение станций опробования. Точками обозначены станции опробования, MN103 – номер рейса судна «Mare Nigrum»

Район работ включает взморье (глубина >5 м), подводную часть дельты (5–25 м), авандельту, расположенную на внутреннем и частично внешнем шельфе (25–50 м), и часть внешнего шельфа (50–81 м) Черного моря.

Взморье представляет собой прибрежную опресненную полосу шириной 8–10 км, в которой происходит смешение морских и речных вод. Ее ширина варьирует в зависимости от величины твердого стока Дуная, то приближаясь к берегу, то удаляясь от него. Вдольбереговые течения влияют на распределение осадков, приводя к формированию серии барров и кос в волноприбойной зоне.

Подводная часть дельты характеризуется относительно крутым уклоном

морского дна. Скорости осадконакопления здесь не превышают 5–10 см за 1000 лет [19].

В авандельте происходит осаждение осадочного материала. На границе взаимодействия речных и морских вод формируется зона геохимического барьера с интенсивным развитием процессов абиогенной флокуляции, приводящей к образованию обширных полей пелитов.

Семнадцать станций опробовано с борта румынского НИС «Mare Nigrum» в период с 3 по 7 мая 2012 года в рамках проекта BLACK SEA ERA.NET-WAPCOAST "Water pollution prevention options for coastal zones and tourist areas: Application to Danube Delta front area" (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1

Координаты и глубина моря опробованных станций

№ станции	Широта С	Долгота В	Глубина моря, м
MN103-1*	44° 08' 43.3680"	29° 26' 21.5280"	58,0
MN103-2*	44° 06' 58.2660"	29° 58' 00.3120"	67,0
MN103-3*	44° 15' 07.9020"	30° 07' 52.3260"	80,5
MN103-4*	44° 33' 00.3780"	30° 27' 01.1040"	78,0
MN103-5*	44° 49' 13.2660"	30° 45' 04.5720"	65,0
MN103-6*	44° 54' 00.0780"	30° 30' 00.4500"	54,7
MN103-7*	44° 59' 06.0600"	30° 15' 02.1120"	46,0
MN103-8*	45° 04' 13.1400"	29° 59' 58.2060"	33,6
MN103-9*	45° 07' 22.4460"	29° 47' 33.7920"	17,5
MN103-10*	45° 04' 54.1860"	29° 46' 49.4580"	20,7
MN103-11***			
MN103-12***			
MN103-13*	44° 21' 52.8960"	30° 00' 36.0900"	68,9
MN103-14*	44° 29' 57.7200"	29° 50' 55.5720"	61,5
MN103-15*	44° 37' 10.5120"	29° 42' 11.2920"	50,4
MN103-16*	44° 44' 57.7920"	29° 34' 56.4120"	24,6
MN103-17*	44° 24' 52.5900"	29° 30' 03.6060"	53,0
MN103-18*	44° 20' 08.3160"	29° 01' 36.0300"	34,5
MN103-19**	44° 00' 34.4820"	29° 58' 50.9220"	73,8-

* Станции, отобранные с помощью дночерпателя и мультикорера, ** станции, отобранные только с помощью дночерпателя, *** станции, запланированных для отбора, но не выполненные по ряду причин.

Опробование произведено с помощью дночерпателя 0,1 м² van Veen и Мультикорера Mark II-400 с четырьмя трубками, каждая 60 см длиной и 10 см в диаметре. В работе представлены результаты обработки проб поверхностных отложений, отобранных при помощи дночерпателя.

Гидрохимические параметры воды измерены при помощи гидрологического зонда, оснащенного 11 батометрами и датчиками (STD). Прозрачность измерена при помощи диска Секки. Для исследований фораминифер отобраны образцы осадков из верхних 2 см пробы из дночерпателя при помощи деревянной лопатки и двух колец с диаметром 10 см каждое. Верхние 2 см осадков являются предпочтительными для данного типа исследований, поскольку такая мощность отвечает 4–20 годам в регионе со скоростями осадконакопления от 1 до 5 мм в год [13]. Пробы зафиксированы 4% раствором формалина, разбавленного с морской водой и Бенгальской Розовой с целью выявления живых (окрашенных) экземпляров по методике [3, 28].

Таблица 2
Параметры морской среды, измеренные на станциях опробования

№ станции	Придонная вода					Донные отложения
	ПР, м	С, psu	РК	Ен, мВ	Chl-a, мг/л	Сорг, %
MN103-1	11,5	18,3	8,65	160	0,21	3,67
MN103-2	11,5	18,3	7,78	258	0,11	3,08
MN103-3	12,5	18,9	4,05	193	0,07	4,15
MN103-4	9,5	18,5	7,61	193	0,08	3,88
MN103-5	12,5	18,3	8,1	157	0,30	3,44
MN103-6	6,5	18,2	9,21	193	0,44	4,39
MN103-7	6,0	18,3	8,63	144	0,37	3,37
MN103-8	2,5	18,2	7,94	196	1,1	2,50
MN103-9	2,0	17,8	7,09	143	1,5	2,23
MN103-10	н.и.	17,9	6,5	146	н.и	2,12
MN103-13	11,0	18,3	7,93	154	0,13	3,51
MN103-14	8,0	18,3	8,31	93	0,23	4,15
MN103-15	3,5	18,2	8,26	131	0,23	3,64
MN103-16	1,2	18,0	7,2	114	1,08	2,03
MN103-17	9,0	18,3	7,83	130	0,23	3,63
MN103-18	10,0	18,2	6,54	138	1,14	2,61
MN103-19	н.и.	н.и	н.и	н.и	н.и	н.и

н.и. – не измерялись

Все обнаруженные виды/подвиды изучены и сфотографированы в электронном сканирующем микроскопе в университете Манитобы (Виннипег, Канада). Особое внимание уделено деформированным раковинам. Коллекция фораминифер хранится в Палеонтологическом музее Одесского национального университета имени И. И. Мечникова (Одесса, Украина) [28].

Для статистической обработки использован корреляционный анализ из пакета программы Статистика 10. В обработку включены количественные показатели семи типов морфологических деформаций и пять основных параметров придонной среды, наиболее важных для жизни фораминифер: соленость (С), глубина (Г), прозрачность (ПР), растворенный кислород (РК), редокс-потенциал (Еh), органический углерод (Сорг), хлорофилла (Chl-a).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всего обнаружено 15 низших таксонов бентосных фораминифер [28]. Морфологические деформации раковины отмечены в семи из них: *Ammonia tepida* (Cushman), 1928; *Ammonia compacta* Hofker, 1969; *Ammonia ammoniformis* (d'Orbigny), 1826; *Porosononion subgranosus mediterranicus* Yanko, 1989; *Nonion matagordanus* Kornfeld, in Cushman, 1939; *Canalifera parkerae* Yanko, 1974; *Criboelphidium poeyanum* (d'Orbigny), 1839.

Основные типы деформаций приведены на рис. 2. Их можно подразделить на простые и комбинированные. Последние в работе не рассматриваются из-за малочисленности находок.

Простые деформации представлены «опухолями» (рис. 2, фиг. 2, 5, 9, 10, 11, 12, 16, 18), нарушением порядка навивания камер (рис. 2, фиг. 3, 6, 14, 20), «сиамскими близнецами» (рис. 2, фиг. 8, 15, 17, 19), недоразвитыми раковинами и вздутиями раковин (рис. 2, фиг. 13). Комбинированный тип деформаций сочетает в себе комбинацию нескольких простых типов (рис. 2, фиг. 1, 4, 7).

Ранее показано, что таксономическое разнообразие и количественные характеристики фораминифер на румынском шельфе Черного моря определяют три главных фактора [28]. Фактор 1 (главный) положительно коррелируется с глубиной, прозрачностью, соленостью, электропроводностью, температурой, содержанием SiO_2 , CaCO_3 , C/N и отрицательно с алевритами. Фактор 1 представляет собой расстояние от берега или глубину бассейна – чем дальше от берега, тем глубже и тем выше соленость и тесно связанная с ней электропроводность, а значит тем слабее опресняющее влияние дунайских вод. Таким образом, глубина бассейна определяет состояние экосистемы опосредованно, в первую очередь, через влияние солености придонной воды.

Вторым по значимости является Фактор 2, который положительно коррелируется с растворенным кислородом, степенью насыщения воды кислородом и отрицательно с SiO_2 . Фактор 2 представляет собой эвтрофикацию водной толщи, эффект которой возрастает от поверхности ко дну моря и которая носит пятнистый характер.

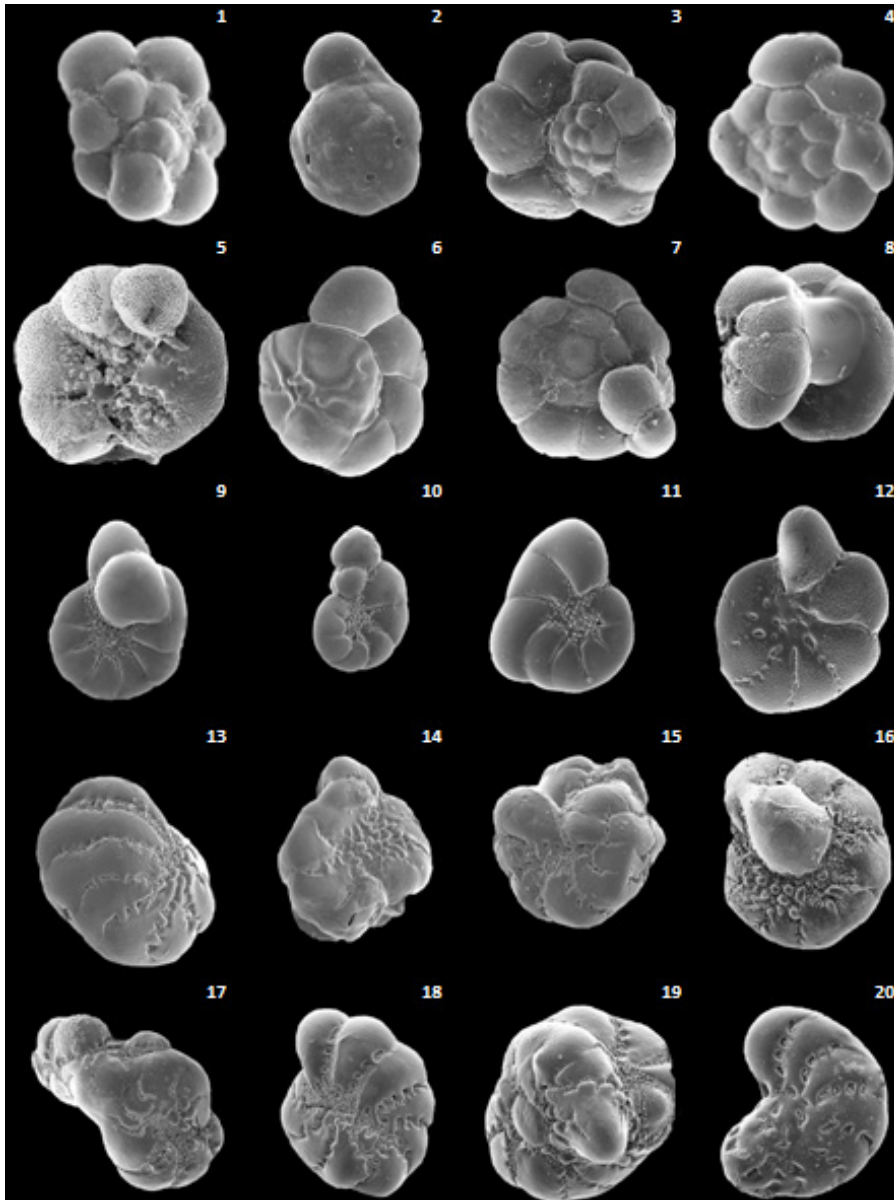


Рис. 2. Примеры деформированных раковин фораминифер румынской части северо-западного шельфа Черного моря, прилегающего к румынской части дельты Дуная: *Ammonia ammoniformis* (1,3,4), *Ammonia tepida* (2), *Ammonia contracta* (5,6,7,8), *Nonion matagordanus* (9–11), *Criboelphidium roeuanum* (12), *Porosonion subgranosus mediterranicus* (13–18), *Sanalifera parkerae* (19–20). «Опухолевые» проявления морфологических аномалий – фиг. 2, 5, 9, 10, 11, 12, 16, 18; нарушения навивания – 3, 6, 14, 20; сиамские близнецы – 8, 15, 17, 19; вздутые раковины – 13; комбинированные – 1 (нарушение навивания с недоразвитием камер), 4 (нарушение навивания с недоразвитием камер и опухолью), 7 (недоразвитие раковины и опухоль)

Фактор 3 (наименее значимый) положительно коррелируется с Eh и коэффициентом сортировки осадков So. Фактор 3 представляет собой антропогенное загрязнение придонной толщи воды органикой, привносимой Дунаем. Это отражают значения тесно связанных между собой показателей Eh и pH, которые характеризуют состояние воды, показанное на диаграмме Пурбе [28].

При статистической обработке значимые коэффициенты корреляции с параметрами среды обнаруживают деформированные раковины трех видов: *A. tepida*, *P. subgranosus mediterranicus* и *N. matagordanus*.

Количество раковин *A. tepida* с «опухолевыми» деформациями, недоразвитием раковин и нарушением навивания камер имеет обратную зависимость с соленостью, прозрачностью морской воды и C_{org} (табл. 3), т.е. с Фактором 1 [28]. Максимальное количество раковин с этими типами деформаций обнаружено на взморье и в авандельте.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между типами деформаций и параметрами среды для вида *Ammonia tepida*.

Полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции

Параметры среды	«Опухоли»	«Сиамские близнецы»	Нарушение навивания	Недоразвитие раковины	Вздутия
S, psu	-0,75	0,29	-0,67	-0,68	0,44
D, m	-0,87	0,48	-0,78	-0,8	0,47
Tr, m	-0,65	0,82	-0,66	-0,77	0,4
Do, mg/l	-0,15	-0,13	-0,05	-0,09	-0,01
Eh, mV	-0,34	0,31	-0,19	0,34	0,05
C_{org}	-0,9	0,15	-0,72	-0,77	0,73

Прозрачность воды напрямую зависит от количества органики (Chl-a), поступающей с суши, и способствующей развитию первичной продукции. Содержание Chl-a повышается по направлению к берегу. Обратная корреляция раковин с недоразвитием раковин и нарушением навивания камер имеет место с C_{org} , а этот параметр имеет наиболее высокие значения на наружном шельфе за счет распада диатомовых водорослей [28].

Все перечисленное позволяет предположить, что понижение солености и прозрачности отрицательно влияет на нормальное функционирование цитоскелета, приводя к указанным типам деформаций раковин *A. tepida*.

Увеличение содержания «сиамских близнецов» *A. tepida* с повышением прозрачности воды (а значит и солености), указывает на отсутствие влияния речного стока на образование данного типа деформаций. Аналогичная ситуация со вздутиями раковин, но уже по отношению к C_{org} . Диатомовые водоросли, которые являются одним из главных компонентов пищи фораминифер и за

счет которых повышается содержания $C_{орг}$ в донных осадках, могут каким-то образом влиять на формирование данного типа деформаций (обилие пищи и вздутие цитоплазмы?).

Сходная картина наблюдается у *P. subgranosus mediterranicus* (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между типами деформаций и параметрами среды для вида *Porosonion subgranosus mediterranicus*.

Полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции

Параметры среды	«Опухоли»	«Сиамские близнецы»	Нарушение навивания	Недоразвитие раковины	Вздутия
С	-0,59	-0,20	-	0,03	-0,48
Г	-0,68	-0,24	-	0,21	-0,78
ПР	-0,64	0,04	-	0,26	-0,54
РК	-0,14	-0,14	-	0,02	-0,15
Eh	-0,31	0,41	-	0,66	-0,2
$C_{орг}$	-0,85	-0,16	-	-0,1	-0,76

Количество раковин *N. matagordanus* с «опухольями» и недоразвитием имеют прямую корреляцию с редокс потенциалом Eh, т.е. с Фактором 3, представляющим антропогенное загрязнение опять-таки за счет органики, привносимой Дунаем.

Таким образом, «опухольи», нарушение навивания и недоразвитие раковин *A. tepida*, *P. subgranosus mediterranicus* и *N. matagordanus* может служить индикатором стрессовых условий, вызываемых речным стоком.

«Сиамские близнецы» встречены только у *A. tepida* и *N. matagordanus* (табл. 3, 5).

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между типами деформаций и параметрами среды для вида *Nonion matagordanus*.

Полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции

Параметры среды	«Опухоли»	«Сиамские близнецы»	Нарушение навивания	Недоразвитие раковины	Вздутия
С	0,44	0,75	-	0,04	0,29
Г	0,62	0,46	-	0,25	0,11
ПР	0,42	0,36	-	0,28	0,1
РК	0,15	-0,83	-	0,04	0,04
Eh	0,56	0,21	-	0,71	-0,1
$C_{орг}$	0,42	0,35	-	-0,08	0,2

У первого их количество увеличивается с глубиной (=соленостью), а во втором – с понижением содержания кислорода, т.е. тоже с глубиной. Создается впечатление, что комбинация повышения глубины, солёности и понижения кислорода, способствует развитию подобных форм патологического морфогенеза раковин.

ВЫВОДЫ

1. Речной сток Дуная оказывает стресс на индивидуальное развитие *A. tepida* и *P. subgranosus mediterranicus* и, соответственно, может вызывать определенные типы морфологических деформаций их раковин («опухоли», нарушение навивания, недоразвитие раковины), которые могут быть использованы в качестве индикаторами его негативного воздействия на морские экосистемы.

2. Деформации по типу «сиамские близнецы» могут быть использованы в качестве индикаторов ухудшения кислородного режима в бассейне, а вздутия раковин – переизбытка питательных веществ.

3. Полученные данные хорошо вписываются в результаты предыдущих исследований [28], которые показали, что пресноводный сток обуславливает стресс морских экосистем и влияет на количественные и качественные характеристики фораминифер.

4. Экспериментальные работы в этом направлении крайне желательны с целью выявления функционирования цитоскелета в условиях стресса, вызванного речным стоком.

Таким образом, цель работы достигнута и получен дополнительный критерий в виде определенных типов морфологических деформаций раковин фораминифер для прослеживания влияния речного стока на морские экосистемы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа является составной частью и выполнена при финансовой поддержке европейского проекта BS-ERA.NET 076 “Water pollution prevention options for coastal zones and tourist areas: Application to the Danube Delta front area” (WAPCOAST). Автор благодарит штат судна «Маре Нигрум» за помощь в получении фактического материала; докторов наук Габриеля Йона (руководитель проекта, ГеоЕкоМар, Бухарест, Румыния) и Йоргена Мёблус (Институт биогеохимии и морской химии Гамбургского университета, Германия) за предоставление результатов химического анализа воды и осадков; кандидата геол. н. С. В. Кадурина за помощь в экспедиционных работах; доктора наук Равиндер Сидху за предоставленную возможность изучения фораминифер в электронном сканирующем микроскопе в университете Манитобы в Канаде; анонимных рецензентов за критические замечания при обсуждении полученных результатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богданович А. К.* Милилиды и пенероплиды [Текст] / Богданович. // Труды ВНИГРИ, новая серия. – 1952. – №64. – С. 338.
2. *Кравчук А. О.* Сульфидизация бентосных фораминифер как проявление современных изменений геоэкологических условий на северо-западном шельфе Черного моря [Текст] / Кравчук. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2011. – №2. – С. 55–60.
3. *Янко В. В.* Позднечетвертичные фораминиферы Черного моря / В. В. Янко, Т. С. Троицкая. – Москва: Наука, 1987. – 136
4. *Alve E.* Benthic foraminifera in sediment cores reflecting heavy metal pollution in Sørfjord [Текст] / E. Alve // Journal of Foraminiferal Research. – 1991. – №21. – С. 1–19.
5. *Boltovskoy E.* Morphological variations of benthic foraminiferal tests in response to changes in ecological parameters: a review [Текст] / E. Boltovskoy, D. B. Scott, F. S. Medioli // Journal of Paleontology. – 1991. – №65. – С. 175–185.
6. *Bresler V.* Acute toxicity of heavy metals for benthic epiphytic foraminifera *Pararotalia spinigera* (Le Calvez) and influence of seaweed-derived DOC [Текст] / V. Bresler, V. Yanko. // Env. Toxicology and Chemistry. – 1995. – №14. – С. 1687–1695.
7. *Bresler V.* Chemical Ecology of Foraminifera: Parameters of Health, Environmental Pathology and Assessment of Environmental Quality [Текст] / V. Bresler, V. Yanko-Hombach. // Environmental Micropalaeontology. – 2000. – С. 217–256.
8. *Bresler V.* Chemical ecology: A new approach to study living benthic epiphytic foraminifera [Текст] / V. Bresler, V. Yanko. // Journal of Foraminiferal Research. – 1995. – №25. – С. 267–279.
9. *Carpenter W. B.* Researches in the foraminifera [Текст] / Carpenter // : Royal Society of London, Philosophical Transactions. – 1856. – №146. – С. 547–569.
10. Effects of lead pollution on *Ammonia parkinsoniana* (foraminifera): ultrastructural and microanalytical approaches [Текст] / [Frontalini, F., Curzi, D., Giordano, F. M. та ін.] // European Journal of Histochemistry. – 2015. – №59. – С. 24–60.
11. Foraminifera as indicators of marine pollution: a culture experiment with *Rosalina leei* [Текст] / R. Sarawat, S. R. Kurtarkar, A. Mazumder, R. Nigam. // Marine Pollution Bulletin. – 2004. – №48. – С. 91–96.
12. *Frontalini F.* The Response of Benthic Foraminiferal Assemblages to Copper Exposure: A Pilot Mesocosm Investigation [Текст] / F. Frontalini, R. Coccioni // Journal of Environmental Protection. – 2012. – №3. – С. 342–352.
13. 13. Geochemistry and anthropogenic signals influenced by the Danube River, NW Black Sea [Текст] / [C. Anagnostou, H. Kaberi, A. P. Karageorgis та ін.] // Abstracts, 3rd International Symposium on the Geology of the Black Sea Region. – 2011. – №17. – С. 13–15.
14. *Le Cadre V.* Low pH effects on *Ammonia beccarii* test deformation: implications for using test deformations as a pollution indicator [Текст] / V. Le Cadre, J. Debenay, M. Lesourd // Journal of Foraminiferal Research. – 2003. – №33. – С. 1–9.
15. *Le Cadre V.* Morphological and cytological responses of *Ammonia* (foraminifera) to copper contamination: implication for the use of foraminifera as bioindicators of pollution [Текст] / V. Le Cadre, J. Debenay // Environmental Pollution. – 2006. – №143. – С. 304–317.
16. *Lidz L.* Sedimentary environments and foraminiferal parameter: Nantucket Bay, Massachusetts [Текст] / Lidz. // Limnology and Oceanography. – 1965. – №10. – С. 392–402.
17. *Melis R.* Distribution and morphological abnormalities of recent foraminifera in the Marano and Grado Lagoon (North Adriatic Sea, Italy) [Текст] / R. Melis, S. Covelli // Mediterranean Marine Science. – 2013. – №14. – С. 432–450.
18. *Murray J. W.* Ecological experiments on Foraminiferida [Текст] / J. W. Murray // Journal of the Marine Biological Association of the UK. – 1963. – №43. – С. 621–642.
19. *Panin N.* Danube River sediment input and its interaction with the north-western Black Sea [Текст] / N. Panin, D. Jipa. // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2002. – №54. – С. 551–562.
20. *Pflum C. E.* Gulf of Mexico deep-water foraminifera [Текст] / C. E. Pflum, W. E. Frerichs. //

- Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication. – 1976. – №14. – С. 1–108.
21. Polovodova I. Foraminiferal test abnormalities in the western Baltic sea [Текст] / I. Polovodova, J. Schönfeld // *Journal of Foraminiferal Research*. – 2008. – №38. – С. 318–336.
 22. Rhumbler L. Die Foraminiferen (Thalamophoren) der Plankton Expedition, Ester Teil Die allgemeinen Organisationsverhältnisse der Foraminiferen [Текст] / Rhumbler L. – Kiel und Leipzig, 1991. – 332 с.
 23. Selye H. Stress without distress [Текст] / Selye. – Philadelphia; New York: J.B. Lippincott, 1974. – 171 с.
 24. Sharifi A. R. Benthic foraminiferis as pollution indicators in Southampton Water, southern England, United Kingdom [Текст] / A. R. Sharifi, L. W. Croudace, R. L. Austin // *Journal of Micropalaeontology*. – 1991. – №10. – С. 109–113.
 25. Yanko V. Benthic foraminifera as indicators of heavy metals pollution – a new kind of biological monitoring for the Mediterranean Sea [Текст] / Yanko // *European Commission, Avicenne, Annual Report*. – 1995. – С. 270.
 26. Yanko V. Effects of marine pollution on benthic Foraminifera, in Sen Gupta, B. K. (ed.), *Modern Foraminifera* [Текст] / V. Yanko, A. J. Arnold, W. C. Parker // *Modern Foraminifera*. – 1999. – №27. – С. 217–235.
 27. Yanko V. Morphological deformities of benthic foraminiferal tests in response to pollution by heavy metals: implications for pollution monitoring [Текст] / V. Yanko, M. Ahmad, M. Kaminski // *Journal of Foraminiferal Research*. – 1998. – №28. – С. 177–200.
 28. Yanko-Hombach V. Benthic foraminifera indicate environmental stress from river discharge to marine ecosystems: example from the Black sea [Текст] / V. Yanko-Hombach, T. Kondariuk, I. Motnenko. // *Journal of Foraminiferal Research*. – 2017. – №47. – С. 70–92.

REFERENCES

1. Bogdanovich, A. K. (1952), Mililidy i peneroplidy, Trudy VNIGRI, novaya seriya, vol. 64, p. 338.
2. Kravchuk A. O. (2011) Sul'fidizaciya bentosnih foraminifer yak proyav suchasnih zmin geoeologichnih umov na pivnichno-zahidnomu shel'fi Chornogo moray [Sulfidization of benthic foraminifera as an indicator of modern changes in geoeological conditions on the north-western shelf of the Black Sea], *Geology and Minerals of the World Ocean*, vol. 2, pp. 55–60.
3. Yanko, V. V. and Troickaya, T. S. (1987), Pozdnechetvertichnye foraminifery Chernogo moray [Late Quaternary Foraminifera of the Black Sea], Moskva: Nauka, p.136.
4. Alve, E. (1991), Benthic foraminifera in sediment cores reflecting heavy metal pollution in Sørfjord, Western Norway, *Journal of Foraminiferal Research*, vol. 21, pp.1–19.
5. Anagnostou, C., Kaberi, H., Karageorgis, A.P., Kafousia, N. and Garoufalia, C., (2011), Geochemistry and anthropogenic signals influenced by the Danube River, NW Black Sea, *Abstracts, 3rd International Symposium on the Geology of the Black Sea Region*, pp. 13–15.
6. Boltovskoy, E., Scott D. B and Medioli, F. S. (1991), Morphological variations of benthic foraminiferal tests in response to changes in ecological parameters: a review, *Journal of Paleontology*, vol. 65, p. 175–185.
7. Bresler, V. and Yanko, V. (1995), Acute toxicity of heavy metals for benthic epiphytic foraminifera *Pararotalia spinigera* (Le Calvez) and influence of seaweed-derived DOC, *Env. Toxicology and Chemistry*, vol. 14, pp. 1687–1695.
8. Bresler, V. and Yanko, V. (1995), Chemical ecology: A new approach to study living benthic epiphytic foraminifera, *Journal of Foraminiferal Research*, vol. 25, pp. 267–279.
9. Bresler, V. and Yanko-Hombach, V. (2000), Chemical Ecology of Foraminifera: Parameters of Health, Environmental Pathology and Assessment of Environmental Quality, *Environmental Micropalaeontology*, pp. 217–256.
10. Carpenter, W. B. (1856), Researches in the foraminifera, *Royal Society of London, Philosophical Transactions*, vol. 146, pp. 547–569.
11. Frontalini, F., Coccioni, R. (2012), The Response of Benthic Foraminiferal Assemblages to

- Copper Exposure: A Pilot Mesocosm Investigation, *Journal of Environmental Protection*, vol. 3, pp. 342–352.
12. Frontalini, F., Curzi D., Giordano F. M., Bernhard J. M., Falcieri E., Coccioni R. (2015), Effects of lead pollution on *Ammonia parkinsoniana* (foraminifera): ultrastructural and microanalytical approaches, *European Journal of Histochemistry*, vol. 59, pp. 24–60.
 13. Le Cadre, V., and Debenay, J. P. (2006), Morphological and cytological responses of *Ammonia* (foraminifera) to copper contamination: implication for the use of foraminifera as bioindicators of pollution, *Environmental Pollution*, vol. 143, pp. 304–317.
 14. Le Cadre, V., Debenay, J. P., and Lesourd, M. (2003), Low pH effects on *Ammonia beccarii* test deformation: implications for using test deformations as a pollution indicator, *Journal of Foraminiferal Research*, vol. 33, pp. 1–9.
 15. Lidz, L. (1965), Sedimentary environments and foraminiferal parameter: Nantucket Bay, Massachusetts, *Limnology and Oceanography*, vol. 10, pp. 392–402.
 16. Melis, R., and Covelli S. (2013), Distribution and morphological abnormalities of recent foraminifera in the Marano and Grado Lagoon (North Adriatic Sea, Italy), *Mediterranean Marine Science*, vol. 14/1, pp. 432–450
 17. Murray, J. W. (1963), Ecological experiments on Foraminiferida, *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, vol. 43, pp. 621–642.
 18. Panin, N. and Jipa, D. (2002), Danube River sediment input and its interaction with the north-western Black Sea, Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, vol. 54, pp. 551–562.
 19. Pflum, C. E. and Frerichs, W. E. (1976), Gulf of Mexico deep-water foraminifers, Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication, vol. 14, pp. 1–108.
 20. Polovodova, I., Schönfeld, J. (2008), Foraminiferal test abnormalities in the western Baltic sea, *Journal of Foraminiferal Research*, vol. 38, no. 4, pp. 318–336.
 21. Rhumbler, L. (1991), Die Foraminiferen (Thalamophoren) der Plankton Expedition, Ester Teil Die allgemeinen Organisationsverhältnisse der Foraminiferen, *Kiel und Leipzig*, p. 332.
 22. Sarawat, R., Kurtarkar, S. R., Mazumder, A., Nigam, R. (2004), Foraminifers as indicators of marine pollution: a culture experiment with *Rosalina leei*, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 48, pp. 91–96.
 23. Selye, H. (1974), Stress without distress, Philadelphia; New York: J.B. Lippincott, p. 171.
 24. Sharifi, A. R., Croudace, L. W., and Austin, R. L. (1991), Benthic foraminiferis as pollution indicators in Southampton Water, southern England, United Kingdom, *Journal of Micropalaeontology*, vol. 10, pp. 109–113.
 25. Yanko, V. (1995), Benthic foraminifera as indicators of heavy metals pollution – a new kind of biological monitoring for the Mediterranean Sea, *European Commission, Avicenne, Annual Report*, p. 270.
 26. Yanko, V., Ahmad, M., Kaminski, M. (1998), Morphological deformities of benthic foraminiferal tests in response to pollution by heavy metals: implications for pollution monitoring, *Journal of Foraminiferal Research*, vol. 28 (3), pp. 177–200.
 27. Yanko, V., Arnold, A. J., and Parker, W. C. (1999), Effects of marine pollution on benthic Foraminifera, in Sen Gupta, B. K. (ed.), *Modern Foraminifera*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 217–235.
 28. Yanko-Hombach, V., Kondariuk, T., and Motnenko, I. (2017), Benthic foraminifera indicate environmental stress from river discharge to marine ecosystems: example from the Black sea, *Journal of Foraminiferal Research*, vol. 47, no. 1, pp. 70–92.

Надійшла 24. 10. 2018

Т. О. Кондарюк, фахівець палеонтологічного музею ОНУ
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна
tanya_kondaruk@ukr.net

МОРФОЛОГІЧНІ ДЕФОРМАЦІЇ ЧЕРЕПАШОК БЕНТОСНИХ ФОРАМІНІФЕР ЯК ІНДИКАТОР СТРЕСУ МОРСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА ПІД ВПЛИВОМ ПРІСНОВОДНОГО СТОКУ

Резюме

У статті представлені результати дослідження латерального розподілу морфологічних деформацій черепашок форамініфер на румунському шельфі Чорного моря у зв'язку із впливом прісного стоку річки Дунай. Особливості морфології та життєвого циклу бентосних форамініфер мають ряд переваг у порівнянні з іншими організмами та дозволяють використовувати їх як індикатори морських екосистем.

Мета полягає в вивченні морфологічних особливостей форамініфер у зв'язку з впливом на них річкового стоку.

Район досліджень включає північно-західну частину шельфу Чорного моря, що прилягає до румунської авандельти Дунаю. Матеріали були відібрані з борту румунського науково-дослідного судна "Mare Nigrum" 3–7 травня 2012 року (рейс MN-103) в рамках проекту WAPCOAST. Пробовідбір здійснювався за допомогою дночерпателя 0.1 m² van Veen. Для аналізу форамініфер зразки відбиралися з верхніх двох сантиметрів непорушених відкладів. Всі знайдені екземпляри форамініфер були таксономічно ідентифіковані та морфологічно досліджені. Зразки всіх видів були досліджені з використанням скануючої електронної мікроскопії (SEM) в Університеті Манітоби, Вінніпег, Канада. Знайдено 15 видів бентосових форамініфер. Деформації зустрічаються у 6 видів *Ammonia tepida*, *Ammonia compacta*, *Ammonia ammoniformis*, *Porosonion subgranosus mediterranicus*, *Nonion matagordanus*, *Canalifera parkerae*. При статистичній обробці тільки у трьох видів були значні коефіцієнти кореляції з параметрами придонного середовища: *Ammonia tepida*, *Porosonion subgranosus mediterranicus*, *Nonion matagordanus*. Виділяються два основних типи аномалій: прості та комбіновані. Основними простими деформаціями є "пухлини", порушення навівання, "сиамські близнюки", нерозвиненість черепашки, здуття черепашки. У статті розглядаються лише прості деформації. Найпоширенішими простими деформаціями для всіх видів є пухлини. Найчастіше вони з'являються у виду *Ammonia tepida*.

Таксономічне різноманіття та кількісні характеристики форамініфер на румунському шельфі Чорного моря визначають три головних фактори. Фактор 1 (основний) представляє собою відстань від берега або глибину басейну. Другим за значимістю є Фактор 2, який являє собою евтрофікацію водної товщі. Фактор 3 – це антропогенне забруднення придонної товщі води, що приносить Дунай. Річковий стік Дунаю створює стресові умови для індивідуального розвитку *A. tepida* та *P. subgranosus mediterranicus* і, відповідно може викликати певні

типи морфологічних деформацій їх черепашок. Деформації за типом «сіамські близнюки» можна використовувати в якості індикаторів погіршення кисневого режиму в басейні, а вздуття черепашок – надлишку поживних речовин. Отримані дані узгоджуються із результатами попередніх досліджень, які показали, що прісноводний стік спричиняє стрес морських екосистем.

Ключові слова: форамініфери, морфологічні деформації, Чорне море, дельта Дунаю, стресові умови.

T. O. Kondariuk

Odessa I. I. Mechnikov National University,
Dvorianskaya St., 2, Odessa, 65082, Ukraine
tanya_kondaruk@ukr.net

MORPHOLOGICAL DEFORMITIES IN BENTHIC FORAMINIFERA TESTS AS INDICATORS OF MARINE ENVIRONMENTAL STRESS UNDER THE FRESHWATER RUNOFF

Abstract

Problem Statement and Purpose. This article represents the results of studying the lateral distribution of morphological deformations in foraminifera shells on the Romanian shelf of the Black Sea in connection with the influence of the freshwater inflow of the Danube River. In comparison with other organisms, features of the morphology and life cycle of benthic foraminifera offer a number of advantages for this kind of study, allowing using them to be readily used as indicators of various conditions in marine ecosystems. The purpose of this project is to study morphological features of foraminifera in connection with the influence on them of river inflow.

Materials & Methods. The study area includes the northwestern part of the Black Sea shelf adjacent to the Romanian part of the Danube delta. Seventeen stations were sampled on-board the Romanian research vessel «Mare Nigrum» on 3–7 May 2012 (Cruise MN-103) within the framework of the WAPCOAST project. Sediments were recovered by 0.1 m² Van Veen Grab. For foraminiferal analysis, the sediment samples were recovered by grab from undisturbed surface (0–2 cm) sediment. All specimens were morphologically examined and taxonomically identified. Examples of all species were imaged using Scanning Electron Microscopy (SEM) at the University of Manitoba, Winnipeg, Canada.

Results. 15 species of benthic foraminifera were recovered. Deformations were found in 6 species: *Ammonia tepida*, *Ammonia compacta*, *Ammonia ammoniformis*, *Porosonion subgranosus mediterranicus*, *Nonion matagordanus*, and *Canalifera parkerae*. After statistical analysis, only 3 species gave significant correlation coefficients with parameters of the bottom environment: *Ammonia tepida*, *Porosonion subgranosus mediterranicus*, and *Nonion matagordanus*. There are two main types of abnormalities: simple and combined. The basic simple deformations are "tumors" on test chambers, breaking the spiral of the test, "Siamese twins," (accreted tests),

underdevelopment and swelling of the test. In the article, only simple deformations are considered. The most common simple deformations for all the species encountered were tumors. Most often, these appear in the species *Ammonia tepida*. The taxonomic diversity and quantitative characteristics of foraminifera on the Romanian Black Sea shelf suggest three main factors at work. Factor 1 (the main one) is the distance from the coast. The second most significant is Factor 2, which is the eutrophication of the water column. Factor 3 is anthropogenic pollution of the bottom layer of water that enters the study area from the Danube.

The Danube River creates stressful conditions for the individual development of *A. tepida* and *P. subgranosus mediterranicus*, and, accordingly, it may cause the morphological deformations. Deformations of the "Siamese twins" type can be used as indicators of deterioration in the oxygen regime of the basin, and the swelling of the tests – an excess of nutrients. The findings are consistent with the results of previous studies that have shown that freshwater drainage causes stress in marine ecosystems.

Keywords: foraminifera, morphological deformations, Black Sea, Danube Delta, environmental stress.