

УДК 563.125.3: 551.352.41(265.53)

ОСОБЕННОСТИ РАСТВОРЕНИЯ РАКОВИН ФОРАМИНИФЕР В ОХОТСКОМ МОРЕ

© 2018 А.В. Романова¹, С.П. Плетнев², В.К. Аннин², Т.С. Тарасова³

¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, 690022; e-mail: sandra_ru@bk.ru

²Тихоокеанский океанологический институт В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, 690041

³Национальный научный центр морской биологии ДВО РАН, г. Владивосток, 690041

Изучены планктонные (ПФ) и бентосные фораминиферы в 95 пробах поверхностных осадков с целью выявления особенностей растворения их карбонатных раковин в Охотском море. Комплексный анализ различных показателей растворения фораминифер позволил установить зависимость интенсивности и характера растворения от особенностей гидрологического режима, глубины, продуктивности и седиментационных процессов. Низкое общее содержание раковин ПФ (0.1 экз / г сухого осадка) в донных осадках прибрежного и северного районов определяется высокими скоростями осадконакопления, а отсутствие тонкостенных видов — их экологическими предпочтениями. Распределение ПФ в центральной части моря неоднородно, их низкое содержание в осадках (1–27 экз / г сухого осадка) и отсутствие тонкостенных видов, скорее всего, связано с локальными седиментационными и геохимическими условиями, нежели с процессами растворения ПФ в водном столбе. Наибольшая интенсивность растворения ($Frag = 50\%$) зафиксирована в районе Курильской глубоководной котловины. Детальные исследования при помощи сканирующего электронного микроскопа позволили установить морфологические изменения раковин доминирующих видов *Neoglobobulimina pachyderma* sin и *Globigerina bulloides*, связанные с растворением.

Ключевые слова: планктонные и бентосные фораминиферы, растворение, осадконакопление, Охотское море.

ВВЕДЕНИЕ

Сохранность раковин фораминифер является одним из главных индикаторов условий осадконакопления, а также динамики, свойств глубинных и придонных вод (Proxies ..., 2007). Известно, что эти воды недонасыщены карбонатом кальция, поэтому раковины планктонных фораминифер (ПФ), оседающие на морское дно, подвергаются процессам растворения (Berger, 1971). Коррозионные среды образуются также и при разложении органического вещества, еще некоторое время содержащегося в раковинах, и в кишечниках хищников, питающихся фораминиферами (Schiebel, 2002). По некоторым данным (Schiebel, 2002), только 25% раковин ПФ достигает дна. Определяя значение этих организмов в круговоротах CO_2 в системе океан-атмосфера, одни авторы считают ее значительной (Barker, Elderfield, 2002; Davies et al., 2017), другие придерживаются противоположной

точки зрения (Berger et al., 1982), утверждая, что скорости растворения кальция в толще воды значительно меньше скоростей поступления этого элемента из других источников. Однако на глубине несколько тысяч метров интенсивность растворения карбоната кальция сильно возрастает. Этот уровень называется фораминиферным лизоклином (Berger et al., 1982). Он разделяет комплексы фораминифер хорошей сохранности и уже подвергшиеся некоторому растворению. С этим определением тесно связаны такие термины, как критическая глубина карбоната накопления — уровень, ниже которого содержание $CaCO_3$ в осадках составляет меньше 10%, и глубина карбонатной компенсации — граница, разделяющая карбонатосодержащие и полностью бескарбонатные осадки. Ниже ее опускающиеся на дно организмы с карбонатным скелетом полностью растворяются (Peterson, Prell, 1985). Положение этих уровней определяется физико-химическими свойствами среды

(давление, температурой воды, содержанием CO_2), соотношением скорости осаждения и растворения CaCO_3 и менялось во времени.

Реконструируя условия среды на основе фораминиферового анализа, необходимо учитывать влияние растворения на качественный и количественный состав тафоценозов микроорганизмов. При этом не только зафиксировать сам процесс разрушения раковин, но и оценить его интенсивность, а также определить характер изменения химического состава фораминиферовых раковин. Ведь все это, как показали исследования зарубежных коллег (Brown, Elderfield, 1996; Eggins et al., 2003), оказывает влияние еще и на результаты геохимических анализов (изотопный кислородный, углеродный, соотношение Mg/Ca).

В центральной части Охотского моря биогенные карбонатные остатки представлены в основном ПФ и кокколитофоридами (Honjo, Manganini, 1996). Закономерности растворения ПФ здесь мало изучены, и специальных работ, посвященных этой проблеме нет. В имеющихся публикациях (Беляева, Бурмистрова, 2003; Хусид и др., 2009; Чеховская и др., 2001), как правило, исследователи лишь отмечали наличие фрагментов и корродированных раковин в отложениях из разных частей моря. Количественная и качественная оценка степени растворения фораминифер ими не проводилась.

Целью настоящего исследования являлось изучение особенностей растворения раковин фораминифер в поверхностных осадках различных районов Охотского моря.

СОВРЕМЕННАЯ ГИДРОЛОГИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Охотское море расположено в северо-западной части Тихого океана у берегов Азии и отделяется от океана цепью Курильских о-вов и п-овом Камчатка. Оно относится к морям смешанного материково-окраинного типа. 40% акватории моря составляет шельф (Безруков, 1960). Химический состав вод в Охотском море зависит от происхождения самих вод, условий водообмена с Тихим океаном, пресноводного стока, биологических и химических процессов (Гидрометеорология ..., 1992).

Море характеризуется субарктической гидрологической структурой. В наиболее суровые зимы ледяной покров занимает до 99% площади всей акватории моря, а в мягкие — 65% (Гидрометеорология ..., 1998). В результате его таяния в летнее время происходит опреснение поверхностного слоя вод, что влияет на изменение его химических характеристик — кислотности, щелочности, содержание растворенного кислорода и других (Гидрометеорология ..., 1992).

Ежегодно в море за счет положительного баланса между атмосферными осадками и испарением дополнительно поступает 382 км^3 пресных вод (Talley, Nagata, 1995). Некоторые исследователи отмечают, что процесс таяния льда незначительно влияет на содержание карбоната кальция и щелочность поверхностного слоя воды, в то время как воды р. Амур существенно изменяют эти показатели, особенно в северной мелководной части моря (Ляхин, 1970; Павлова и др., 2008).

Температура (Т) поверхностной водной массы (0–40 м) в весенний период составляет около 2.5°C , соленость (S) — 32.5‰ , в летний — $10\text{--}13^\circ\text{C}$ и 32.8‰ , соответственно. Конвективное зимнее охлаждение верхней части водного столба приводит к образованию подповерхностного слоя минимума температур — охотоморского дихотермального слоя — на глубине в среднем от 50 до 150 м. На глубине 100 м он имеет следующие характеристики: $T = -1.3^\circ\text{C}$, $S = 32.9\text{‰}$ (Freeland et al., 1998; Wong et al., 1998). Ниже, от 200 до 1000 м, расположен относительно однородный слой со слабо возрастающими сверху вниз температурой ($1\text{--}2^\circ\text{C}$) и соленостью ($33.4\text{--}34.3\text{‰}$) — охотоморская промежуточная водная масса (ОПВМ). ОПВМ считается важным компонентом для образования относительно плотной, распресненной и хорошо снабженной кислородом северотихоокеанской промежуточной водной массы (Talley, 1991). Трансформированная старая глубинная тихоокеанская вода (600–1300 м) представлена в виде теплого промежуточного слоя с максимальными значениями $T = 2.3^\circ\text{C}$, $S = 34.3\text{‰}$ на глубине 750–1000 м. Водная масса южной котловины (более 1300 м) с $T = 1.85^\circ\text{C}$ и $S = 34.7\text{‰}$ происходит от глубинной водной массы Северо-Западной Пацифики (Богданов, Мороз, 2000). Глубинные воды Курильской котловины характеризуются повышенным содержанием растворенного кальция по отношению к щелочности вод, что указывает на геохимическую природу такого несоответствия (Павлова и др., 2008).

Для северной части Тихого океана глубина фораминиферового лизоклина, находится на уровне 3000 м, хотя первые признаки начала растворения раковин отмечаются с 1000 м в отличие от Атлантического океана, где лизоклин расположен на глубине 4500 м (Berger, 1970). В Охотском море содержание растворенного кальция и щелочности в глубинных и придонных охотоморских водах (более 1400 м) выше, чем в тихоокеанских (Павлова и др., 2008).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования послужили 95 поверхностных проб донных отложений

(рис. 1), любезно предоставленные авторам сотрудниками Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН) А.Н. Деркачевым и С.А. Горбаренко. Поверхностные пробы были отобраны вдоль меридионального профиля (149°50' в.д.) в 42 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» во время экспедиции ТОИ ДВО РАН и ФГУНПП «СЕВМОРГЕО» «Магадан-Южные Курилы» (2006 г.), а так же по площади моря во время 55-го рейса НИС «Профессор Гагаринский» экспедиции ТОИ ДВО РАН (2011 г.). Пробы вдоль меридионального профиля были получены с помощью ударной прямоточной трубки с вкладышами длиной 4 м и с внутренним диаметром 9 см. Пробы во время 55 рейса НИС «Профессор Гагаринский» были отобраны многотрубчатым пробоотборником (мульти-корер, модель МС-800) с 8 трубами, диаметром 6 см и длиной 70 см.

Планктонные и бентосные фораминиферы (БФ) изучались из образцов верхнего слоя керна 0–5 см. Все пробы обрабатывались по единой методике. Сухой осадок промывали под слабой струей воды с помощью сита с диаметром ячейки 63 мкм, чтобы защитить раковины фораминифер от дополнительной фрагментации. В работе использована классификация фораминифер А. Леблича и Х. Тэппена (Loeblich, Tappan, 1987). С помощью стереоскопического микроскопа МБС-10 производился общий подсчет раковин фораминифер различных видов, количество фрагментов их раковин. На основе полученных данных для каждого образца высчитывался индекс фрагментарности (Frag) по следующей формуле (Berger et al., 1982):

$$\text{Frag} = \text{Nfr} * 100\% / \text{Ntotal},$$

где Nfr — количество фрагментов и Ntotal — общее содержание фораминифер. Индекс был рассчитан для образцов, содержащих количество

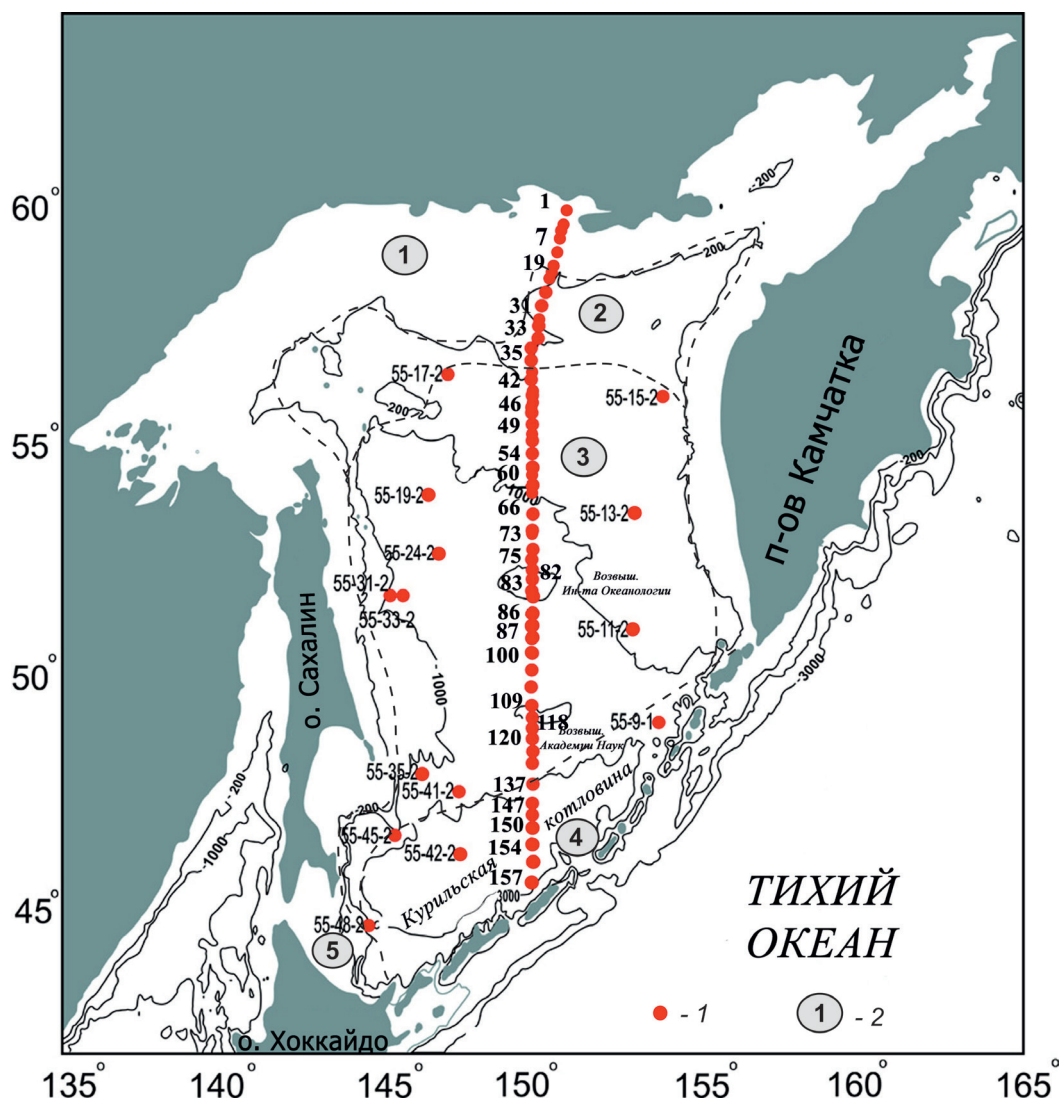


Рис. 1. Расположение точек отбора поверхностных проб донных осадков (1) и выделенные ранее биогеографические районы (2) по ПФ (Романова, 2014): 1 — Прибрежный, 2 — Северный, 3 — Центральный, 4 — Южный, 5 — Юго-Восточный. Изобаты в метрах.

раковин, необходимых для получения статистически достоверных результатов (300 раковин).

Бентосные фораминиферы имеют обычно толстые и гладкие раковины, которые более устойчивы к растворению, чем раковины ПФ, и соотношение между целыми раковинами двух групп также указывает на процессы растворения (Proxies ..., 2007). Дополнительно производился подсчет БФ и рассчитывалось соотношение бентосных к планктонным фораминиферам (БФ/БФ+ПФ).

Ультраструктурные изменения раковин фораминифер, которые позволяют судить о характере растворения, а именно изменения толщины стенки раковины, формы кристаллов ее внешнего слоя, размеров пор, сохранности последней камеры, подробно изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Zeiss EVO 50 XVP в Лаборатории геохимии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ распределения основных показателей растворения раковин фораминифер (наличие фрагментов и корродированных раковин, значения индекса фрагментарности, присутствие тонкостенных видов ПФ, соотношения бентосных и планктонных фораминифер) по площади Охотского моря выявил их зависимость от особенностей гидрологического режима, глубины, продуктивности ПФ, седиментационных процессов. Это позволило, сделать вывод о приуроченности проявлений растворения карбонатов к ранее выделенным в море районам: Прибрежному, Северному, Центральному и Юго-Восточному (Романова, 2014).

В Северном районе, включающем северный шельф и континентальный склон, в осадках, представленных мелкозернистым песком с алевролитовым заполнителем и алевролитовым пелитом с редкой окатанной галькой, ПФ и их фрагменты отсутствуют на большинстве изученных станций. Одиночные раковины (0.1 экз/г сухого осадка) толстостенных видов *Neogloboquadrina pachyderma* и *Globigerina bulloides* встречены лишь в осадках станций 19, 21, 24, 31. Незначительное количество раковин не позволило рассчитать индекс фрагментарности для данных станций. Следы растворения на самих раковинах не отмечены. Показатели БФ/БФ+ПФ, полученные для станций 1–18, высокое и равно 1 за счет значительного содержания БФ (до 130 экз). На станциях 19, 21, 24 этот показатель варьирует от 0 до 0.6 (таблица).

Особенности донных осадков Центрального района определяются рельефом дна и

глубинами. Осадки, представленные крупнозернистым песком с примесью гальки (рис. 1, ст. 35–41) и алевролитовым пелитом с песчаной примесью (рис. 1, ст. 39–62), характерны для относительно небольших глубин 209–842 м. На больших глубинах (967–1390 м) осадки представлены диатомовым пелитом (рис. 1, ст. 71–115) и пелитовым алевролитом (рис. 1, ст. 118–120). Этот район характеризуется мозаичным распределением БФ и ПФ, что обуславливает и неоднородность значений показателей растворения. На станциях 34–42, 46–48, 55–19–2 ПФ не обнаружены. На станциях 33, 43, 49–54, 60, а также станциях 55–15–2, 55–17–2 наблюдается низкая концентрация ПФ в осадках, которая изменяется от 1 до 16 экз/г сухого осадка. В отложениях представлены наиболее резистентные к растворению виды *N. pachyderma sin.* и *G. bulloides*, имеющие хорошую сохранность. Фрагментов раковин мало, индекс фрагментарности не превышает 4%. Показатели БФ/БФ+ПФ для этих станций составляет 0.82–1. На станциях 66, 73, 74, а также 55–11–2, 55–32–2, 55–33–2 помимо *N. pachyderma sin.* и *G. bulloides* в отложениях представлены раковины тонкостенного вида *Turborotalita quinqueloba*. На этих станциях заметно увеличивается содержание раковин в осадке (274–340 экз/г сухого осадка), фрагментов или каких-либо видимых следов коррозии на раковинах ПФ не выявлено. Индекс фрагментарности составляет 0–3%. Показатели БФ/БФ+ПФ варьирует от 0.2 до 1. В отложениях станций 54, 65 отмечено низкое содержание фораминифер в осадке (27 экз/г сухого осадка), что не дало возможности для расчета индекса фрагментарности. ПФ представлены видами *N. pachyderma sin.* и *G. bulloides* с корродированными раковинами. Показатели БФ/БФ+ПФ составляет 0.82 и 0.29 соответственно. В осадках станции 66, а также станций 55–35–2 содержание ПФ относительно высокое (77–131 экз/г сухого осадка). ПФ представлены всеми видами, встречающимися в Охотском море: *N. pachyderma*, *G. bulloides*, *T. quinqueloba*, *G. scitula*, *G. glutinata*, *G. uvula* (Романова, 2014). Следы растворения не выявлены, индекс фрагментарности не превышает 3%. Показатели БФ/БФ+ПФ для этих станций варьирует от 0.21 до 1. Для станций 72, 75, 100, 120 характерно снижение общего содержания ПФ в осадке (84–146 экз/г сухого осадка), тонкостенных видов не обнаружено. Индекс фрагментарности не превышает 5%. Высокая концентрация фораминифер отмечена в осадках, отобранных на возвышенности Института океанологии (станции 82–87), где общее количество раковин увеличивается до 910 экз/г сухого осадка. Танатоценоз

Показатели растворения раковин фораминифер (общее содержание ПФ, максимальные значения индекса фрагментарности, соотношение ПФ и БФ, присутствие в осадках раковин тонкостенных видов) в различных районах Охотского моря (Романова, 2014).

Район	Станции	Глубина, м	Тип осадков	Общее содержание ПФ в осадке, экз/г сухого осадка	Max Frag, %	БФ/БФ+ПФ	Тонкостенные виды
Прибрежный	7–19	100–170	Песчаные илы	0–0.1	0	1	-
Северный	19–31	180–240	Алеврито-глинистые илы	0–30	0	0–0.6	-
Центральный	35–132; 55–11–2 55–13–2 55–15–2 55–17–2 55–19–2 55–31–2 55–33–2 55–35–2 55–41–2	180–1580	Крупно-зернистый песок с примесью гальки Алевритовый пелит с песчаной примесью Алевритовый диатомовый пелит и пелитовый алеврит	0–449	5	0.03–1	+
Возвышенность Института Океанологии	82–87	940–1020		105–910	10	0.007–0.04	+
Возвышенность Академии наук	109–118	967–1130		946–3116	13	0.01–0.05	+
Юго-восточный (Курильская глубоководная котловина)	137–157; 55–9–1 55–42–2 55–45–2 55–48–2	2790–3538		0–164	50	0.003–1	+

представлен всеми видами ПФ, характерными для центральной части Охотского моря. Следы коррозии на раковинах незначительны. Индекс фрагментарности не превышает 10%. Количество БФ значительно снижается по отношению к ПФ (0.007–0.04). Максимальное содержание фораминифер (946–3116 экз/г сухого осадка) наблюдается в осадках, отобранных в районе возвышенности Академии наук (рис. 1, станции 109–118). Видовой состав аналогичен танатоценозам, характерным для возвышенности Института океанологии (Романова, 2014). Визуально следы коррозии отмечаются на раковинах тонкостенных фораминифер. Количество фрагментов раковин увеличивается незначительно, индекс фрагментарности

достигает 13%. Отношение БФ к общему количеству раковин фораминифер в пробе остается минимальным и составляет 0.01–0.05.

Распределение раковин фораминифер в пелитовых осадках Юго-Восточного района, приуроченного к Курильской впадине (глубины 2790–3090 м), имеет ряд особенностей. В осадках станции 55–45–2 фораминиферы не обнаружены, а в образцах станций 150, 157, 55–9–1 и 55–42–2 встречены лишь одиночные раковины *N. pachyderma* со следами растворения, кроме этого отсутствуют раковины тонкостенных видов. Низкое содержание ПФ и относительно высокое содержание в осадках БФ (12–64 экз/г сухого осадка) определяют высокие показатели показатели БФ/БФ+ПФ (0.82–1). В то же

время в других исследованных образцах (рис. 1, станции 147, 154, 55–48–2), содержание раковин ПФ выше и составляет 164 и 61 экз/г сухого осадка соответственно. Здесь же представлены виды с тонкой стенкой раковины *T. quinqueloba*, *G. glutinata* и *G. uvula*. Заметны следы растворения не только на раковинах тонкостенных видов ПФ, но и устойчивых к растворению *N. pachyderma*. Количество фрагментов максимально, индекс фрагментарности достигает 50%. Показатели БФ/БФ+ПФ снижается и составляет 0.003 и 0.01.

Интенсивность растворения определяется во многом и морфологическим строением самой раковины фораминифер. Особенно это касается ПФ. У глубоководных видов, которые наиболее устойчивы к воздействию недонасыщенных карбонатом кальция вод, внутренняя стенка состоит из небольших ксеноморфных кристаллов на

проксимальной стороне, крупных кристаллов на дистальной стороне, а также крупных кристаллов, образующих кальцитовую корку (Be et al., 1975). Раковины с перечисленными особенностями были встречены в осадках центральной части моря, и принадлежали виду *N. pachyderma sin.* (рис. 2а). На рисунке ясно видно, что значительную часть стенки раковины занимают кальцитовые наросты.

Большая часть образцов для исследования с помощью СЭМ была отобрана преимущественно из Юго-Восточного района (рис. 1, станции 150, 154, 157), в осадках которого встречены наиболее корродированные раковины. При подготовке таких объектов для анализа возникали проблемы как с их размещением на столики, так и напылением. Чрезвычайная хрупкость стенок раковины приводила часто к их разрушению. На рис. 2 и 3 продемонстрирована истонченная стенка

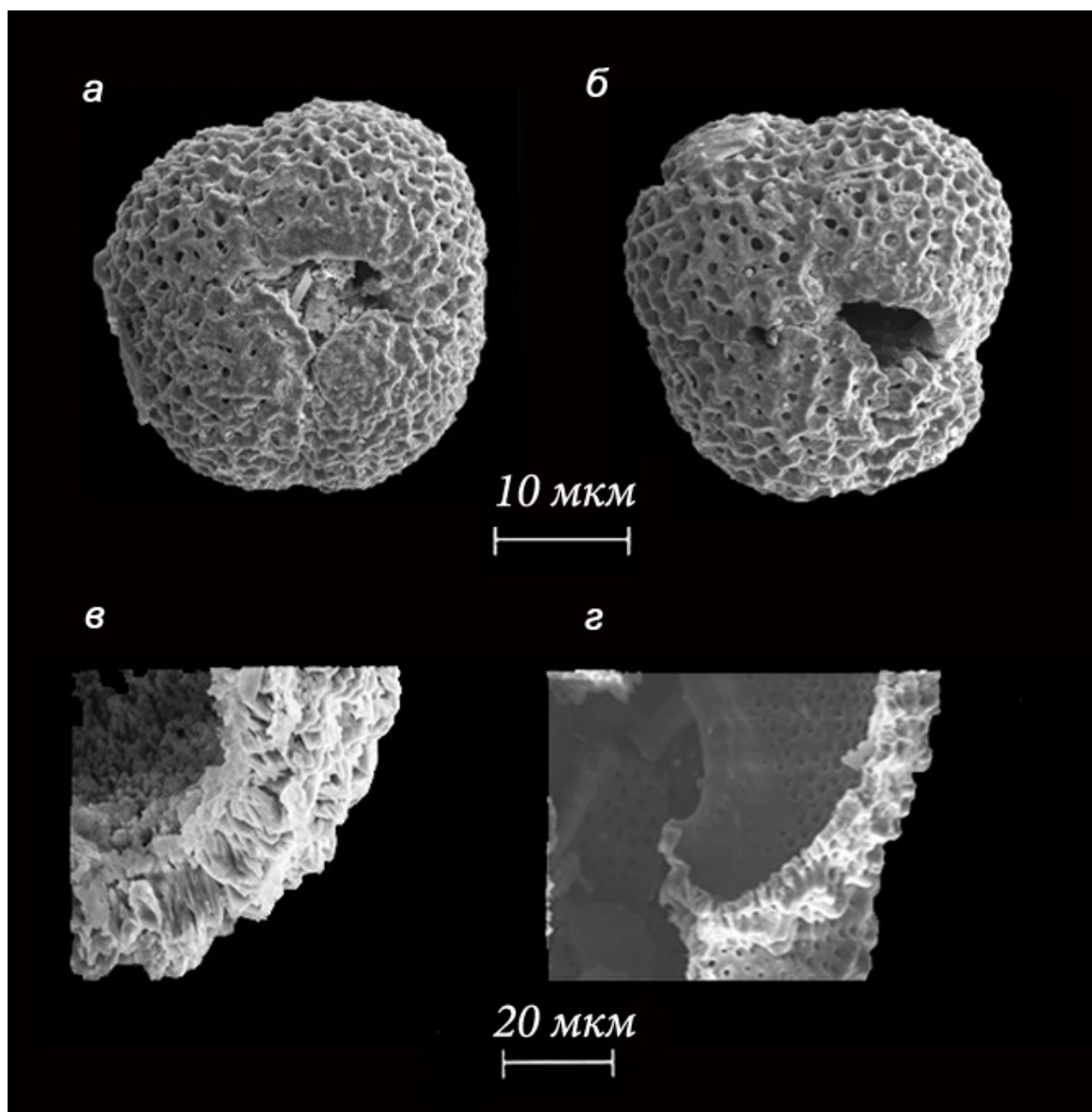


Рис. 2. Особенности скульптуры стенки и толщины раковины фораминифер *N. pachyderma sin.* хорошей сохранности (а, в) и подвергшейся растворению (б, г), выявленные с помощью СЭМ.

(рис. 2б; 3б-г) раковины, более крупные поры (рис. 2б; 3б, 3з), борозды на кальцитовых наростах (рис. 3в). Иногда на стенках *N. pachyderma sin.* и *G. bulloides* наросты практически «стираются» вплоть до внутренней стенки раковины (рис. 2б; 3б-г). Зафиксирована еще одна особенность — в первую очередь разрушению подвергается последняя камера (рис. 3в). Сходная ситуация была отмечена и другими специалистами при условиях повышенной растворимости раковин (Be et al., 1975).

ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что усиление растворения карбонатов отражается на показателях БФ/БФ+ПФ, уменьшении, как общего содержания ПФ, так и содержания тонкостенных видов в осадке, а также увеличении количества фрагментов раковин (Proxies ..., 2007).

По данным наших исследований высокое содержание БФ характерно для мелководной прибрежной зоны, что соответствует первому максимуму количественного распределения БФ, расположенному на глубине от 0 до 250 м (Саидова, 1961). Мелководные обстановки северной части моря отличаются интенсивной вертикальной циркуляцией вод, в результате чего придонные воды обогащены кислородом, а поверхностные воды насыщены питательными веществами, что определяет высокие показатели первичной продукции фитопланктона (Аржанова, Зубаревич, 1997). Вместе с тем, условия этого района не способствуют активному развитию ПФ. Определяющим фактором, влияющим на это, наряду с уже перечисленными, является поступление холодных распресненных вод. Соответственно, и в осадках содержание раковин ПФ очень низкое, причем, встреченные единичные экземпляры не имели следов

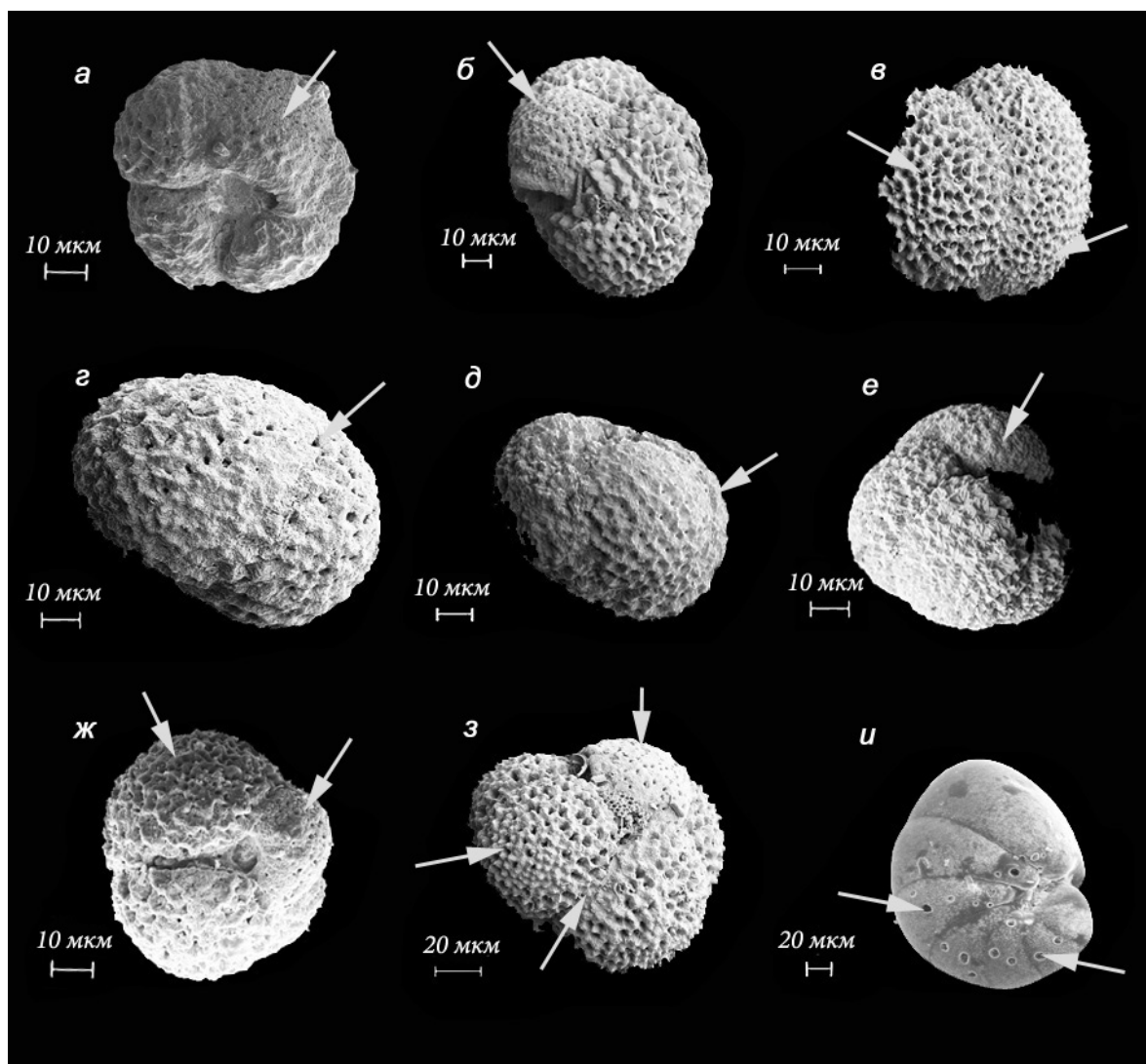


Рис. 3. Признаки растворения на раковинах фораминифер *N. pachyderma sin.* (а, б, г, д, е, ж, з), *G. bulloides* (в) и *Nonionellina labradorica* (и). Стрелками указаны основные структурные изменения: истончение стенки раковины (а, в, д, и), увеличенные поры (б, в, г, з), стертые кальцитовые наросты на последней камере (а, б, д, е, ж, з).

растворения. Это связано с тем, что воды этих районов характеризуются низкой агрессивностью по отношению к карбонату кальция. Сходная океанографическая ситуация характерна для Сахалинского и Камчатского склонов, где степень насыщения воды кальцием $> 80\%$, а также Сахалинского залива с показателем около 100% (Павлова и др., 2008).

Низкое содержание ПФ и относительно высокое БФ приводит к высоким значениям БФ/БФ+ПФ в прибрежной зоне. Подобная ситуация характерна для некоторых станций центральной части моря, расположенных в пределах распространения глубинной тихоокеанской водной массы (400–1500 м), которая насыщает придонные воды кислородом. Интенсивное поступление органического вещества на дно (Аржанова, Зубаревич, 1997) в этих районах обеспечивает высокую продуктивность БФ. Как следствие, увеличивается содержание их раковин в осадке, что соответствует второму максимуму количественного распределения БФ (Саидова, 1961). На возвышенностях показатели соотношения БФ и ПФ кардинально меняются. Здесь концентрация ПФ в разы превышает содержание раковин БФ в осадках. Таким образом, такой показатель интенсивности растворения как отношение БФ к общему содержанию фораминифер, скорее всего, отражает продуктивность отдельных групп фораминифер, и использовать его для характеристики сохранности танатоценозов фораминифер можно лишь косвенно. Стоит отметить, что в некоторых глубоководных районах Охотского моря, а именно, Курильской котловине доля секреторных БФ снижается и увеличивается роль агглютинирующих, более приспособленных к недонасыщенным по отношению к карбонату кальция водам. Это было отмечено и другими исследователями (Саидова, 1961; Bubenshchikova et al., 2008). Вероятно, соотношение представителей этих двух групп можно рассматривать в качестве косвенного критерия при оценке влияния растворения на танатоценозы фораминифер.

В Баренцевом море, арктическом бассейне со сходными ледовыми условиями, прослеживается четкая закономерность уменьшения показателей БФ/БФ+ПФ, а также секреторных и агглютинирующих видов фораминифер в районах с глубинами 500–700 м, где отмечается более интенсивное растворение (Steinsund, Hald, 1994). Авторы связывают это с влиянием плотных холодных вод повышенной солености, богатых кислородом, которые при опускании на дно создают благоприятные условия для окисления органического вещества и обогащения осадка CO_2 . В условиях отсутствия фотосинтеза из-за покрытой льдом поверхности моря в течение

значительной части года, концентрация CO_2 в придонном слое остается высокой, это усиливает процессы растворения карбонатного вещества на дне. Подобная картина отмечается и для других арктических бассейнов (Kelly, 1970; Kelly, Hood, 1971). Таким образом, суровые ледовые условия являются дополнительным фактором, усиливающим растворение карбонатных раковин фораминифер в арктических морях. Можно предположить, что подобный механизм растворения карбонатов в Охотском море может действовать на приматериковом шельфе. Хотя с другой стороны, малое количество ПФ, увеличение содержания секреторных БФ с глубиной, характерное для этой области, не позволяют провести полную аналогию с другими арктическими бассейнами. Еще одним фактором, свидетельствующим не в пользу сходства гидрохимических условий анализируемых водоемов, могут служить результаты сравнения особенностей растворения раковин, проведенных на основе сопоставления фотографий фораминифер из Баренцева (Steinsund, Hald, 1994) и Охотского морей. Анализ выявленных изменений позволил сделать вывод о меньшей интенсивности растворения раковин в Охотском море. Скорее всего, на карбонатную систему данного моря определяющее влияние оказывают другие причины, в первую очередь, его связь с Тихим океаном через глубоководные проливы. И потом, по мнению Ю.И. Ляхина (1970), процессы образования и таяния льда не играют основополагающей роли в карбонатной системе современного Охотского моря. Впрочем, не исключено, что в эпохи похолодания климата и ослабления водообмена с открытым океаном механизм усиления растворения в условиях суровой ледовой обстановки работал.

Выявленное неоднородное распределение, как общего количества ПФ, так и отсутствие тонкостенных видов в донных осадках Центрального района, можно было бы объяснить различными глубинами и, возможно, положением промежуточной водной массы, которые обуславливают изменение активности и продолжительности воздействия процессов растворения раковин при их опускании на дно. Интересную информацию по этому вопросу могут дать исследования материала из планктонных ловушек. По данным изучения других карбонатных организмов — микроводорослей кокколитофорид из седиментационной ловушки, установленной в центральной части Охотского моря на глубине 1061 м (Broerse et al., 2000), до 82% кокколитов не достигает дна, растворяясь в водной толще. Первые признаки разрушения панцирей фиксируются уже на глубине 256 м. С. Альдерман (Alderman, 1996), изучавшая ПФ из этой же седиментационной ловушки, при-

знаков растворения раковин не обнаружила. Это может быть объяснено тем, что раковины ПФ более устойчивы к растворению по сравнению с панцирями кокколитофорид, которые характеризуются малыми размерами панциря и низкой скоростью погружения (Paul et al., 1988). Кокколиты в большей массе погружаются на дно отдельными панцирями, реже в агрегатах фекальных пеллет или конгломератами с диатомовыми водорослями (Broerse et al., 2000).

Сравнительный анализ таксономического состава и структуры фораминиферовой ассоциации из ловушки и танатоценоза со станции донного профиля не обнаружил их существенных различий (Романова, 2014). Более того, следов коррозии на раковинах ПФ не обнаружено. При этом стоит отметить, что в донных отложениях были встречены раковины одного из наиболее неустойчивых к растворению вида *G. glutinata*.

Тем не менее, по мнению А. Броерс (Broerse et al., 2000), агрессивность вод по отношению к карбонату кальция увеличивается с глубиной. Учитывая большие глубины (макс. 3372 м) в районе Курильской котловины (Удинцев, 1957), можно предположить, что ПФ здесь будут растворяться в водном столбе и, соответственно, попадать на дно уже в измененном виде или вообще его не достигать. И действительно, вблизи Курильских о-вов было зафиксировано самое большое количество обломков и корродированных раковин. Вместе с тем, в некоторых изученных нами образцах, отобранных из этого района, были найдены раковины ПФ, при этом на ряде станций, расположенных на глубине более 3000 м (станции 147, 154), встречались виды с тонкой стенкой. К. Курихара также отмечал, что нет четкой закономерности в распределении раковин ПФ в Курильском бассейне: в некоторых образцах имеются тонкостенные виды, в других — только один вид *N. pachyderma* (Kurihara, 1982). Другие авторы указывают на явные признаки растворения раковин ПФ, обнаруженные ими в виде фрагментов (Беляева, Бурмистрова, 2003; Чеховская и др., 2001). В то же время, Х.М. Саидова (1961) не выявила следов растворения раковин ПФ на глубине 3000 м. Скорее всего, такое неоднородное распределение ПФ в Курильской котловине, свидетельствует о значительном влиянии локальных придонных процессов. Известно, что застойные условия вблизи дна, создаваемые за счет ослабленной вентиляции морских вод в глубоководных впадинах, приводят к интенсивным геохимическим процессам (Геохимия ..., 1986). Эту точку зрения подтверждают данные А. Бе с соавторами (Be et al., 1975), которые считают, что в толще воды раковины фораминифер растворяются

незначительно, интенсивное их растворение происходит на границе раздела вода-осадок.

Глубоководные районы Охотского моря характеризуются ослабленной вентиляцией вод и высоким содержанием органического углерода в отложениях (Гидрометеорология ..., 1992; Павлова и др., 2008), что, в свою очередь, приводит к образованию значительных концентраций угольной кислоты в поровых водах и, как следствие, усилению растворения на границе раздела вода-осадок. Данную ситуацию подтверждает нормализованная потенциальная щелочность и высокое содержание растворенного кальция в придонных водах глубоководных районов Охотского моря по сравнению с поверхностным слоем (Павлова и др. 2008). Скорее всего, мозаичное распределение ПФ не только в районе Курильской котловины, но и центральной части моря связано именно с процессами активного растворения карбонатов в осадке.

И еще один момент, на котором хотелось бы остановиться. Охотское море, как окраинный бассейн, расположенный в пределах активной зоны перехода от материка к океану, характеризуется высоким содержанием метана и тяжелых углеводородов в придонной воде (Деркачев и др., 2007; Обжиров и др., 2007). И хотя газогидраты сами по себе не вызывают растворения раковин фораминифер, опасность представляет среда, которая образуется в местах их выхода.

Известно, что в таких обстановках образуется, так называемая тафономически активная зона, которая характеризуется аноксидными условиями и повышенной активностью био-геохимических процессов, которые приводят к разрушению биогенных карбонатов (Cai et al., 2006; Davies et al., 1989; Walker, 2001). Так, для района впадины Дерюгина, для которого отмечены высокие значения pH (7.44), значительные содержания CO_2 в придонном слое и повышенные концентрации органических кислот в осадке (Павлова и др., 2008; Dullo et al., 2004), было установлено, что сохранность раковин не только планктонных, но и бентосных фораминифер в условиях аноксидной обстановки чрезвычайно низкая (Деркачев и др., 2007; Хусид и др., 2009). По нашим данным, на ст. 55–17–2, в пробе, отобранной вблизи впадины Дерюгина, ПФ представлены единичными раковинами *N. pachyderma sin.*

Комплексное изучение различных показателей растворения фораминифер в донных отложениях Охотского моря позволило сделать следующие выводы:

Интенсивность процессов растворения карбонатных раковин фораминифер обусловлена, прежде всего, гидрологическими характеристиками района обитания фораминифер, а также

связанной с ними продуктивностью экологических групп этих организмов.

В северной части моря следов растворения раковин ПФ и БФ не обнаружено. Низкое общее содержание раковин ПФ (0.1 экз / г сухого осадка) в донных осадках этого района обусловлено в большей степени значительным количеством терригенного материала, поступающего в осадок, а отсутствие тонкостенных видов — их экологическими предпочтениями.

Соотношение ПФ и БФ, как критерий растворения карбонатного вещества для Охотского моря не является показательным, так как определяющим для БФ являются, в первую очередь, поступление первичной продукции и содержание кислорода в придонном слое.

Распределение ПФ в центральной части моря неоднородно, низкое содержание ПФ в осадке (1–27 экз / г сухого осадка) и отсутствие тонкостенных видов, скорее всего, зависит от локальных седиментационных и геохимических условий, нежели процессов растворения ПФ в водном столбе.

Высокая интенсивность растворения, выявленная по большому количеству фрагментов раковин (Frag = 5 0%) и степени их коррозированности, обнаружена в районе Курильской котловины. Это связано с агрессивностью вод по отношению к карбонату кальция, увеличивающейся с глубиной, и интенсивными геохимическими процессами на дне.

Изученные в СЭМ раковины хорошей сохранности образованы крупными кристаллами, формирующими кальцитовую корку. Раковины, подвергшиеся значительному растворению, отличаются истонченной стенкой, более крупными порами и бороздами на кальцитовых наростах, при этом последняя камера наиболее разрушена.

Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН 15–I–2–063 и РФФИ 15–04–03553.

Список литературы

Аржанова Н.В., Зубаревич В.Л. Сезонные изменения биогенных элементов в Охотском море как основа для оценки продукции фитопланктона // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. Сборник научных трудов. М.: Изд-во ВНИРО, 1997. С. 92–97.

Безруков П.Л. Донные отложения Охотского моря // Труды института океанологии АН СССР. 1960. Т. 32. С. 15–95.

Беляева Н.В., Бурмистрова И.И. Планктонные фораминиферы в осадках Охотского моря // Океанология. 2003. Т. 43. № 2. С. 219–227.

Богданов К.Т., Мороз В.В. Структура, динамика и гидролого-акустические характеристики вод проливов Курильской гряды. Владивосток: Дальнаука, 2000. 150 с.

Геохимия осадочного процесса в Балтийском море. М.: Наука, 1986. 230 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 167 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 343 с.

Деркачев А.Н., Николаева Н.А., Можеровский А.В. Минералого-геохимические признаки существования аноксидных условий осадконакопления в локальных котловинах Охотского моря в позднем плейстоцене-голоцене // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 26. № 3. С. 3–33.

Ляхин Ю.И. Насыщенность карбонатом кальция морской воды Охотского моря // Океанология. 1970. Т. 10. № 6. С. 980–986.

Обжиров А.И., Пестрикова Н.Л., Шакиров Р.Б. и др. Районы газогидратопроявления в пределах Охотского моря. // Вестник ДВО РАН. 2007. № 1. С. 42–51.

Павлова Г.Ю., Тищенко П.Я., Недашковский А.П. Распределение щелочности и растворенного кальция в Охотском море // Океанология. 2008. Т. 48. № 1. С. 23–32.

Романова А.В. Планктонные фораминиферы из поверхностных осадков Охотского моря // Вестник ДВО РАН. 2014. № 3. С. 85–94.

Саидова Х.М. Экология фораминифер и палеогеография дальневосточных морей СССР и северо-западной части Тихого океана. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 232 с.

Удинцев Г.Б. Рельеф дна Охотского моря // Труды института океанологии АН СССР. 1957. Т. 22. С. 13–76.

Хусид Т.А., Беляева Н.В., М.П. Чеховская и др. Фораминиферы в верхнеплейстоценовых и голоценовых осадках (Впадина Дерюгина, Охотское море) // Океанология. 2009. Т. 49. № 5. С. 762–772.

Чеховская М.П., Басов И.А., Горбаренко С.А. Позднечетвертичные планктонные фораминиферы северо-восточного окончания Курильской котловины (Охотское море, ст. В34–98) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2001. Т. 9. № 4. С. 99–112.

Alderman S.E. Planktonic Foraminifera in the Sea of Okhotsk: Population and Stable Isotopic Analysis from a sediment Trap. M.I.T. / W.H.O.I. Masters Thesis. 1996. P. 88.

- Barker S., Elderfield H.* Foraminiferal calcification response to glacial-interglacial changes in atmospheric CO₂ // *Science*. 2002. V. 297. Iss. 5582. P. 833–836.
- Bé A. W.H., Morsem J.W., Harrison S.M.* Progressive dissolution and ultrastructural breakdown in planktonic foraminifera // *Cushman Foundation for Foraminiferal Research*. 1975. Spec. publ. 13. P. 27–55.
- Berger W.H.* Planktonic foraminifera: Selective solution and the lysocline // *Marine Geology*. 1970. V. 8. Iss. 2. P. 111–138.
- Berger W.H.* Sedimentation of planktonic foraminifera // *Marine Geology*. 1971. V. 11. Iss. 5. P. 325–358.
- Berger W.H., Bonneau M.-C., Parker F.L.* Foraminifera on the deep-sea floor: Lysocline and dissolution rate // *Oceanolog. Acta*. 1982. V.5. № 2. P. 249–258.
- Bubenshchikova N., Nürnberg D., Lembke-Jene L. et al.* Living benthic foraminifera of the Okhotsk Sea: Faunal composition, standing stocks and microhabitats // *Marine Micropaleontology*. 2008. V. 69. № 3. P. 314–333.
- Broerse A.T.C., Ziveri P., Honjo S.* Coccolithophore (–CaCO₃) flux in the Sea of Okhotsk: seasonality, settling and alteration processes // *Marine Micropaleontology*. 2000. V. 39. Iss. 1–4. P. 179–200.
- Brown S.J., Elderfield H.* Variations in Mg/Ca and Sr/Ca ratios of planktonic foraminifera caused by postdepositional dissolution: evidence of shallow Mg-dependent dissolution // *Paleoceanography*. 1996. V. 11. Iss. 5. P. 543–551.
- Cai W.J., Chen F.Z., Powell E. N. et al.* Preferential dissolution of carbonate shells driven by petroleum seep activity in the Gulf of Mexico // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. V. 248. Iss. 1–2. P. 227–243.
- Davies D.J., Powell E.N., Stanton R.J.* Relative rates of shell dissolution and net sediment accumulation — a commentary — can shell beds form by the gradual accumulation of biogenic debris on the sea-floor // *Lethaia*. 1989. V. 22. Iss. 2. P. 207–212.
- Davies D.J., Rivest E.B., Hill T.M. et al.* Ocean acidification compromises a planktic calcifier with implications for global carbon cycling // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. Article number: 2225. doi:10.1038/s41598-017-01530-9.
- Dullo W.-Chr., Biebow N., Georgeleit K. (eds).* Cruise Report: KOMEX III: RV «Sonne», Cruise 178. GEOMAR report, 2004. 125 p.
- Eggins S., DeDecker P., Marshall A.T.* Mg/Ca variation in planktonic foraminifera tests: Implications for reconstructing palaeo-seawater temperature and habitat migration // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. V. 212. Iss. 3–4. P. 291–306.
- Freeland H.J., Bychkov A.S., Whetney F. et al.* WOCE section PIW in the Sea of Okhotsk. 1. Oceanographic date description // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № C8. P. 15613–15623.
- Honjo S., Manganini S.J.* Dichothermal layer and biological export production in the Sea of Okhotsk // *Proceedings of International workshop on the Okhotsk Sea and Arctic; the Physics and Biochemistry implied to the global cycles, JAMSTEC and STA of Japan* / Ed. Hisida M. 1996. P. 103–110.
- Kelly J.J.* CO₂ in the surface waters of the North Atlantic Ocean and the Barents and Kara Seas // *Limnology and Oceanography*. 1970. V. 15. Iss. 1. P. 80–88.
- Kelly J.J., Hood D.W.* CO₂ in the surface water of ice-covered Bering Sea // *Nature*. 1971. V. 229. P. 37–39.
- Kurihara K.* Planktonic Foraminifera of piston cores from the Kuril Basin, the Sea of Okhotsk // *St. Paul's Rev. Science*. 1982. V. 4. № 3. P. 65–77.
- Loeblich A.R., Tappan H.* Foraminiferal Genera and their Classification. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987. V. 1. 970 p. V. 2. 847 p.
- Paul C.K., Hills S.J., Thierstein H.R.* Progressive dissolution of the fine carbonate particles in pelagic sediments // *Marine Geology*. 1988. V. 81. Iss. 1–2. P. 27–40.
- Peterson L.C., Prell W.L.* Carbonate dissolution in recent sediments of the Eastern Equatorial Indian Ocean: Preservation patterns and carbonate loss above the lysocline // *Marine Geology*. 1985. V. 64. Iss. 3–4. P. 259–290.
- Proxies in Late Cenozoic paleoceanography*. V. 1 / Eds. C. Hillaire Marcel, A. de Vernal. Amsterdam: Elsevir, 2007. 862 p.
- Schiebel R.* Planktic foraminiferal sedimentation and the marine calcite budget. *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. V. 16. Iss. 4. P. 1–13.
- Steinsund P.I., Hald M.* Recent calcium carbonate dissolution in the Barents Sea: Paleoceanographic applications // *Marine Geology*. 1994. V. 117. Iss. 1–4. P. 303–316.
- Talley L.D.* An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific // *Deep-Sea Res.* 1991. V. 38. Suppl. 1. P. 171–190.
- Talley L.D., Nagata Y.* Review of the Okhotsk Sea and Oyashio Region // *PICES Scientific Report*. 1995. № 2. 227 p.
- Wong C.S., Matear R.J., Freeland H.J., et al.* WOCE line PIW in the Sea of Okhotsk. 2. CFCs and the formation rate of intermediate water // *JGR*. 1998. V. 103. № C8. P. 15625–15642.
- Walker S.E.* Below the sediment–water–interface: a new frontier in taphonomic research // *Palaos*. 2001. V. 16. № 2. P. 113–114.

ОСОБЕННОСТИ РАСТВОРЕНИЯ РАКОВИН
**CARBONATE DISSOLUTION OF FORAMINIFERA SHELLS
IN THE SEA OF OKHOTSK**

A.V. Romanova¹, S.P. Pletnev², V.K. Annin², T.S. Tarasova³

¹*Far Eastern Geological Institute of FEB RAS, Vladivostok, Russia 690022*

²*Pacific Oceanological Institute of FEB RAS, Vladivostok, Russia, 690041*

³*National scientific center of marine biology FEB RAS, Vladivostok, 690041*

95 sediment samples of planktonic (PF) and benthic foraminifera collected along the meridian transect across the Sea of Okhotsk were studied in order to reveal patterns of dissolution. An integrated analysis of the various dissolution indices of foraminifera allowed establishing the dependence of the intensity and characteristics of dissolution on hydrological regime, depth, productivity and sedimentation processes. The low total abundance of PF shells (0.1 specimens/g of dry sediment) in the bottom sediments of the coastal and northern regions is determined by the sedimentation regime, while the lack of thin-walled species is caused by their ecological preferences. The PF in the central part of the sea is distributed heterogeneously: the low content of PF in sediments (1–27 specimens/g of dry sediment) and the lack of thin-walled species are most likely caused by local sedimentation and geochemical conditions, rather than by the processes of PF dissolution in the water column. The highest dissolution rate (Frag = 50%) was recorded in the area of Kuril Basin. Detailed studies using a scanning electron microscope allowed revealing morphological changes in the shells of the dominant species *Neoglobobulimina pachyderma* sin and *Globigerina bulloides* associated with dissolution.

Keywords: planktonic and benthic foraminifera, dissolution, sedimentation, Sea of Okhotsk.