

Научная статья  
УДК 539.26-022.53:563.12+563.12:552.58  
DOI: 10.31857/S0869769824050095  
EDN: HPEBVI

## Применение методов рентгеновской микротомографии для выявления ранних диагенетических изменений раковин фораминифер

Л. О. Утюпин , М. А. Ушкова, А. В. Романова, С. П. Плетнев, А. В. Поселюжная

*Леонид Олегович Утюпин*

инженер

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

leonid.9@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0006-3483-8815>

*Мария Александровна Ушкова*

ведущий инженер

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

m\_ushkova@list.ru

<https://orcid.org/0009-0001-3981-7099>

*Александра Владимировна Романова*

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

sandra\_ru@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2884-1197>

*Плетнев Сергей Павлович*

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,

Владивосток, Россия

pletnev@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9516-7089>

*Анна Владимировна Поселюжная*

старший инженер

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

anna\_ivv@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0004-0368-8856>

**Аннотация.** Методом рентгеновской микротомографии были изучены особенности строения раковин бентосных фораминифер в качестве уточняющего этапа исследования образования вторичного аутигенного карбоната на раковинах фораминифер в местах выхода метана. Не разрушая образцы, были получены изображения внешней поверхности и срезов раковин бентосных фораминифер, а также подсчитаны процентные соотношения объемов раковин,

твердых включений и пустоты внутри раковины образцов. Раковины вида *Nonionellina labradorica*, отобранные из горизонтов осадков, соответствующих интенсивным и продолжительным метановым событиям, при сравнении с раковинами того же вида из горизонтов без метановых событий демонстрируют увеличение среднего значения доли раковины на 26,9%, увеличение среднего значения доли твердых включений почти в 2 раза и уменьшение среднего значения доли пустоты внутри раковины на 10,4%. Для раковин вида *Uvigerina parvocostata* аналогичное сравнение показало следующие результаты: увеличение среднего значения доли раковины на 6,5%, уменьшение среднего значения доли твердых включений в 4 раза, а среднего значения доли пустоты – на 6,3%.

**Ключевые слова:** фораминиферы, Охотское море, рентгеновская микротомография, аутигенный карбонат

**Для цитирования:** Утюпин Л.О., Ушкова М.А., Романова А.В., Плетнев С.П., Поселюжная А.В. Применение методов рентгеновской микротомографии для изучения ранних диагенетических изменений раковин фораминифер // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 5. С. 136–147. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824050095>

**Благодарности.** Авторы выражают глубокую благодарность А.А. Карабцову (ДВГИ ДВО РАН) и В.В. Иванову (ДВГИ ДВО РАН) за ценные советы и помощь в процессе работы.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Дальневосточного геологического института ДВО РАН (тема № 122040800201-8).

Original article

## Application of X-ray microtomography techniques to detect early diagenetic changes in foraminifera shells

L. O. Utyupin, M. A. Ushkova, A. V. Romanova, S. P. Pletnev, A. V. Poselyuzhnaya

*Leonid O. Utyupin*

Engineer

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

[leonid.9@mail.ru](mailto:leonid.9@mail.ru)

<https://orcid.org/0009-0006-3483-8815>

*Maria A. Ushkova*

Leading Engineer

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

[m\\_ushkova@list.ru](mailto:m_ushkova@list.ru)

<https://orcid.org/0009-0001-3981-7099>

*Alexandra V. Romanova*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

[sandra\\_ru@bk.ru](mailto:sandra_ru@bk.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-2884-1197>

*Sergey P. Pletnev*

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher

V.I. Il'yichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

[pletnev@poi.dvo.ru](mailto:pletnev@poi.dvo.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-9516-7089>

Anna V. Poselyuzhnaya  
Senior Engineer  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
anna\_ivv@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-0368-8856>

**Abstract.** The structure of benthic foraminifera shells was studied by X-ray microtomography as a clarifying step in the study of secondary authigenic carbonate formation on foraminifera shells at methane vent sites. Without destroying the specimens, images of the outer surface and sections of benthic foraminifera shells were obtained, and the percentages of shell volumes, solid inclusions, and voids within the shells of the specimens were calculated. Shells of the species *Nonionellina labradorica*, sampled from sediment horizons corresponding to intense and prolonged methane events, compared to shells of the same species from horizons without methane events, show a 26.9% increase in the mean shell fraction, a nearly twofold increase in the mean solid inclusion fraction, and a 10.4% decrease in the mean shell void fraction. For shells of the species *Uvigerina parvocostata*, a similar comparison showed the following results: an increase in the mean value of the shell fraction by 6.5%, a 4-fold decrease in the mean value of the fraction of solid inclusions, and a 6.3% decrease in the mean value of the void fraction.

**Keywords:** foraminifera, Sea of Okhotsk, X-ray microtomography, authigenic carbonate

**For citation:** Utyupin L.O., Ushkova M.A., Romanova A.V., Pletnev S.P., Poselyuzhnaya A.V. Application of X-ray microtomography techniques to detect early diagenetic changes in foraminifera shells. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(5):136–147. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824050095>

**Acknowledgments.** The authors express their deep gratitude to A.A. Karabtsov (FEGI FEB RAS) and V.V. Ivanov (FEGI FEB RAS) for valuable advice and assistance during the work.

**Funding.** The work was performed within the framework of the state assignment of the Far East Geological Institute, FEB RAS (theme No. 122040800201-8).

## Введение

После обнаружения в Охотском море эмиссий метана на морском дне [1] в данном районе были открыты крупные запасы газогидратов [2, 3]. Благодаря этому Охотское море является прекрасным объектом для исследования эмиссий метана. При нарушении условий первичного захоронения газогидраты могут растворяться и высвобождать свободный метан, выходящий на поверхность морского дна. В местах просачивания метана образуются области, в которых придонные и поровые воды, а также живые организмы обеднены тяжелым изотопом  $C^{13}$  [4, 5]. Разница значений  $\delta^{13}C$  между одними и теми же живыми видами в метановых сипах и вне зоны их влияния невелика. В Охотском море в пределах одного вида она меняется от  $-0,3$  до  $-1,0$  ‰ [6]. В ископаемых же раковинах отрицательные значения  $\delta^{13}C$  более изменчивы и достигают  $-40$  ‰ [7, 8]. Бентосные фораминиферы зарекомендовали себя хорошими индикаторами потоков древнего и современного метана [9–13]. По соотношению изотопов  $C^{13}$  и  $C^{12}$  в их карбонатных раковинах можно судить об интенсивности и продолжительности метановых событий.

В последние годы показано, что на отмерших раковинах может дополнительно осаждаться метанпроизводный диагенетический аутигенный карбонат (МДАК) с низкими значениями  $\delta^{13}C$  [4, 7, 9, 14, 15]. МДАК преимущественно представлен высокомагнезиальным кальцитом, кальцитом или арагонитом [14, 16]. Вторичный отрицательный сигнал МДАК может скрывать и перекрывать прижизненную запись  $\delta^{13}C$  фораминифер [7, 17]. Механизм записи  $\delta^{13}C$  и эмиссии метана активно изучается на примере анализа живых и ископаемых фораминифер в разных районах Мирового океана [7, 9–12].

Для исследования диагенетических образований на раковинах фораминифер преимущественно используется сканирующий электронный микроскоп (СЭМ). Данный метод имеет определенные ограничения: изображения, полученные с помощью СЭМ, дают информацию только о внешних характеристиках образца, а подготовка образцов для сканирования предполагает покрытие образца сверхтонким слоем проводящего материала

(обычно используют углерод или металлы: платину, золото), что делает затруднительным дальнейшее проведение геохимических анализов. Внутреннее же строение раковины традиционно изучается методом микроскопического исследования в проходящем свете тонких срезов пород, содержащих фораминиферы, или отдельных образцов, что помимо время- и трудозатрат разрушает образец.

Альтернативой, не имеющей подобных ограничений, является метод рентгеновской микротомографии, который позволяет изучать внутреннее и внешнее строение раковин, не разрушая образец. Рентгеновская микротомография – информативный метод изучения микрообразцов и включений, позволяющий получить 3D модель объекта. Цифровое изображение исследуемого объекта строится на основе теневых проекций, полученных при просвечивании рентгеновским лучом образца. Этот метод успешно применялся для исследования характеристик структур раковин фораминифер, в частности таксономических определений [18, 19], и оценки процесса растворения раковин [20].

Ранее с помощью геохимии стабильных изотопов  $\delta^{13}\text{C}$ , оптической и сканирующей электронной микроскопии были получены результаты изменения характера признаков аутигенной карбонатной минерализации раковин различных видов фораминифер в зависимости от интенсивности влияния метановых просачиваний [21, 22]. Целью данной работы являлось исследование неразрушающим методом рентгеновской микротомографии особенностей строения раковин бентосных фораминифер в качестве уточняющего этапа исследования образования вторичного аутигенного карбоната на раковинах фораминифер в местах выхода метана.

## Образцы и методика

Ранее были определены отрицательные значения  $\delta^{13}\text{C}$  в кальците раковин бентосных фораминифер в колонке донных осадков LV50-05, отобранной в районе активных метановых сипов на восточном склоне о-ва Сахалин в Охотском море. На основе биостратиграфии, значений  $\delta^{13}\text{C}$  в раковинах фораминифер, AMS  $\text{C}^{14}$ -датировок (ускорительная масс-спектрометрия) в исследуемом районе установлены метановые события (МС) в голоцене: МС-1 (700–900 лет); МС-2 (1200–1400 лет), МС-3 (2500–5400 лет) и МС-4 (7400–10 000 лет) [20]. Первичная диагностика раковин фораминифер и оценка степени зарастания стенок раковин аутигенным карбонатом выполнены с помощью бинокуляра МБС-10. Изображения раковин фораминифер при отраженном свете получены с помощью стереомикроскопа Discovery V12 в лаборатории микро- и наноисследований ДВГИ ДВО РАН. Для проведения микротомографического исследования были отобраны по 5–6 раковин видов *Uvigerina parvocostata* и *Nonionellina labradorica* с горизонтов осадков 20–25 и 470–475 см. Раковины фораминифер хорошей сохранности, отобранные в горизонте 20–25 см, подобны раковинам живых фораминифер. Раковины фораминифер из горизонта 470–475 см характеризуются наибольшей степенью обрастания аутигенным карбонатом. Для раковин данного горизонта зафиксированы аномально низкие значения  $\delta^{13}\text{C}$  [22].

Изучение внутреннего строения образцов раковин фораминифер проводилось на рентгеновском микротомографе SkyScan 1272 (Bruker microCT, Бельгия) лаборатории рентгеновских методов Приморского центра локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (Владивосток). Съемка велась без фильтра (напряжение рентгеновского источника 50 кВ, текущий ток 200 мкА), вращение образца от 0 до 180° с шагом 0,2°, размеры пикселя изображения от 1,25 до 1,5 мкм, формат изображения 2452 × 1640 пиксел (экспозиция 750 мсек). Изображения образцов были подготовлены с помощью программ NRecon 1.7.1.0 (Bruker microCT), DataViewer 1.5.3.4 (64-bit) и CTvox 3.3.0 r1403 (64-bit) (Bruker microCT).

Образцы разделены на 4 группы согласно виду и горизонту отбора. Образцы каждой группы сканировались одновременно. С помощью программы реконструкции изображений NRecon для каждого образца был сформирован персональный набор данных для последующего анализа в программе CT Analyser 1.16.9.0+(64-bit) (Bruker microCT). Область анализа для каждого образца (Region of Interest, сокращенно, ROI) посредством программы была ограничена его внешним контуром.

Наличие твердых включений в раковинах было визуализировано с помощью программ DataViewer 1.5.3.4 (64-bit) и CTvox 3.3.0 r1403 (64-bit) (Bruker microCT). Показатели рентгеновской плотности включений определены посредством программы CT Analyser.

## Результаты и обсуждение

Предварительные исследования раковин на световом и сканирующем микроскопе показали, что вид *U. parvocostata* наименее подвержен зарастанию МДАК, в то время как вид *N. labradorica* более подвержен накоплению аутигенного карбоната на внешней стенке раковины [21, 22].

По итогам микротомографического сканирования были получены 3D-изображения образцов, демонстрирующие внутреннее строение раковины как в полном объеме образца, так и на заданном поперечном срезе. По имеющимся изображениям были построены фото-таблицы, содержащие изображения раковин в световом микроскопе, изображения модели, полученной с помощью микротомографа, изображения раковины в режиме прозрачности с включениями, обозначенными белым цветом, и поперечные срезы раковин (рис. 1, 2).

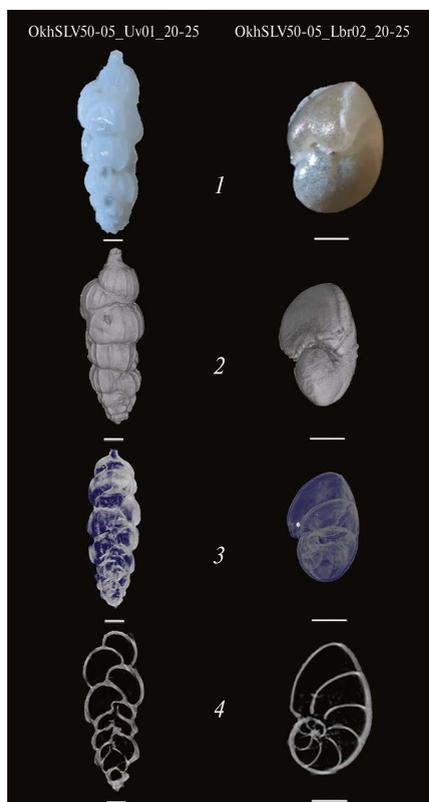


Рис. 1. Раковины бентосных фораминифер *U. parvocostata* (слева) и *N. labradorica* (справа), отобранные с горизонта осадков 20–25 см. Все масштабные линейки равны 100 мкм. Сверху вниз: 1 – изображение в световом микроскопе, 2 – объемное микротомографическое изображение, 3 – микротомографическое изображение в режиме полупрозрачности, 4 – микротомографический поперечный срез раковины

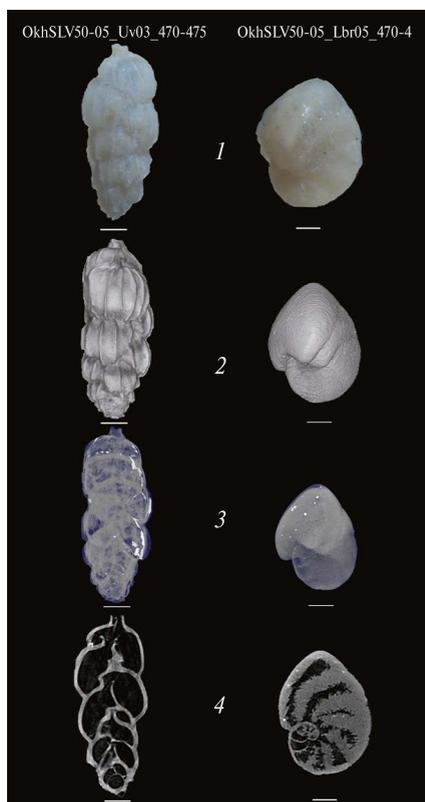


Рис. 2. Раковины бентосных фораминифер *U. parvocostata* (слева) и *N. labradorica* (справа), отобранные с горизонта осадков 470–475 см. Все масштабные линейки равны 100 мкм. Сверху вниз: 1 – изображение в световом микроскопе, 2 – объемное микротомографическое изображение, 3 – микротомографическое изображение в режиме полупрозрачности, 4 – микротомографический поперечный срез раковины

Таблица 1

## Объемы твердых фаз (раковины и твердых включений) и пустот образцов

Образец, номер	Объем образца, мм <sup>3</sup>	Объем пустот в образце, мм <sup>3</sup>	Доля пустот в образце, %	Объем твердых фаз в образце, мм <sup>3</sup>	Доля твердых фаз в образце, %	Объем раковины образца, мм <sup>3</sup>	Доля раковины в образце, %	Объем твердых включений в образце, мм <sup>3</sup>	Доля твердых включений в образце, %
<i>U. parvocostata</i> , горизонт 20–25 см									
OkhSLV50-05_Uv01_20-25	0,03885	0,02509	64,59	0,01376	35,41	0,01376	35,41	0	0
OkhSLV50-05_Uv02_20-25	0,01227	0,00814	66,36	0,00413	33,64	0,00404	32,92	0,0000880	0,72
OkhSLV50-05_Uv03_20-25	0,03248	0,02182	67,18	0,01066	32,82	0,01060	32,65	0,0000553	0,17
OkhSLV50-05_Uv04_20-25	0,02797	0,01845	65,96	0,00952	34,04	0,00952	34,04	0,0000001	0,0002
OkhSLV50-05_Uv05_20-25	0,00729	0,00492	67,53	0,00237	32,47	0,00233	32,02	0,0000324	0,44
OkhSLV50-05_Uv06_20-25	0,02629	0,01883	71,62	0,00746	28,38	0,00738	28,06	0,0000827	0,31
Среднее	0,02419	0,01621	67,21	0,00798	32,79	0,00794	32,52	0,0000431	0,27
<i>U. parvocostata</i> , горизонт 470–475 см									
OkhSLV50-05_Uv01_470-475	0,03036	0,01851	60,95	0,01186	39,05	0,01184	38,98	0,00002	0,07
OkhSLV50-05_Uv02_470-475	0,01272	0,00614	48,31	0,00657	51,69	0,00657	51,67	3,0823E-06	0,02
OkhSLV50-05_Uv03_470-475	0,02642	0,01529	57,87	0,01113	42,13	0,01112	42,11	0,000003	0,01
OkhSLV50-05_Uv04_470-475	0,05304	0,03310	62,41	0,01994	37,59	0,01994	37,59	0	0
OkhSLV50-05_Uv05_470-475	0,01563	0,01026	65,62	0,00538	34,38	0,00538	34,38	0	0
OkhSLV50-05_Uv06_470-475	0,02649	0,01859	70,16	0,00791	29,84	0,00791	29,84	0	0
Среднее	0,02744	0,01698	60,89	0,01046	39,11	0,01046	39,10	0,00001	0,02

Образец, номер	Объем образца, мм <sup>3</sup>	Объем пустот в образце, мм <sup>3</sup>	Доля пустот в образце, %	Объем твердых фаз в образце, мм <sup>3</sup>	Доля твердых фаз в образце, %	Объем раковины образца, мм <sup>3</sup>	Доля раковины в образце, %	Объем твердых включений в образце, мм <sup>3</sup>	Доля твердых включений в образце, %
OkhSLV50-05_Lbr01_20-25	0,00717	0,00497	69,39	0,00219	30,61	0,00218	30,42	0,0000137	0,19
OkhSLV50-05_Lbr02_20-25	0,00344	0,00203	58,99	0,00141	41,01	0,00135	39,28	0,0000597	1,74
OkhSLV50-05_Lbr03_20-25	0,00426	0,00231	54,20	0,00195	45,80	0,00195	45,77	0,0000011	0,03
OkhSLV50-05_Lbr04_20-25	0,01000	0,00674	67,34	0,00327	32,66	0,00326	32,61	0,0000049	0,05
OkhSLV50-05_Lbr05_20-25	0,00656	0,00400	60,96	0,00256	39,04	0,00256	39,00	0,0000021	0,03
Среднее	0,00524	0,00334	51,82	0,00190	31,52	0,00188	31,18	0,0000136	0,34
<i>N. labradorica</i> , горизонт 470–475 см									
OkhSLV50-05_Lbr01_470-475	0,04408	0,01121	25,43	0,03287	74,57	0,03286	74,56	0,0000006	0,01
OkhSLV50-05_Lbr02_470-475	0,01151	0,00668	58,04	0,00483	41,96	0,00483	41,96	0	0
OkhSLV50-05_Lbr03_470-475	0,00952	0,00561	58,98	0,00391	41,02	0,00390	41,01	0,0000001	0,01
OkhSLV50-05_Lbr04_470-475	0,00723	0,00351	48,61	0,00371	51,39	0,00371	51,36	0,0000002	0,02
OkhSLV50-05_Lbr05_470-475	0,03015	0,00538	17,83	0,02477	82,17	0,02466	81,82	0,0000105	0,35
Среднее	0,02050	0,00648	41,78	0,01402	58,22	0,01399	58,14	0,0000023	0,08

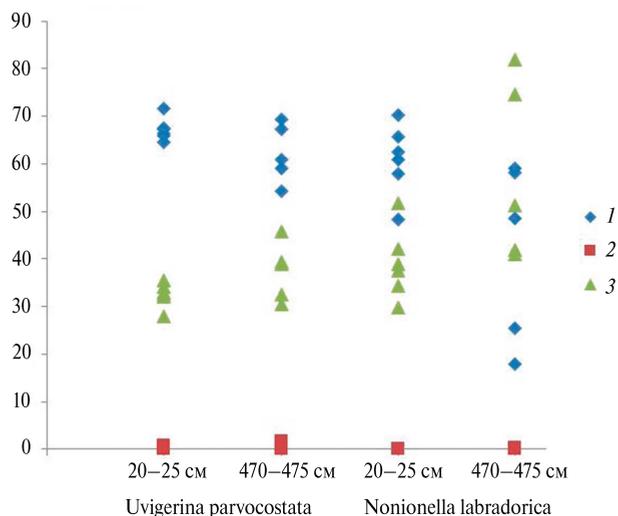


Рис. 3. График распределения значений долей раковины, пустоты и твердых включений в образцах раковин: 1 – доля пустоты в раковине,%; 2 – доля твердых включений в раковине,%; 3 – доля раковины, %

*Внешнее и внутреннее строение раковин.* Показано, что вторичный аутигенный карбонат имеет рентгеновскую плотность, сходную с рентгеновской плотностью первичного карбоната кальция, из которого организм строит свою раковину. Раковины горизонта осадков 20–25 см выглядят более чистыми, стенки раковин гладкие, белые, на поперечном срезе внутренняя полость раковины пустая. Раковины горизонта осадков 470–475 см под бинокляром имеют желтоватую окраску, стенки раковин визуальнo обладают морозоподобной текстурой. На поперечном срезе, полученном с помощью томографа, видно, что внутренняя полость раковин вида *N. labradorica* толще, особенно в последних камерах. Раковины вида *U. parvocostata* также показывают признаки обрастания, хотя в гораздо меньшей степени.

Посредством программы CT Analyser были получены объемы твердых фаз (раковины и твердых включений) и пустот образцов, приведенные в табл. 1. На графике (рис. 3) представлено распределение значений долей раковины, пустоты и твердых включений в исследуемых образцах. Среднее значение доли раковин образцов в горизонте осадков 470–475 см больше на 6,5% для вида *U. parvocostata* и на 26,9% – для вида *N. labradorica*. Среднее значение доли пустот в образцах горизонта осадков 470–475 см уменьшается на 6,3% для вида *U. parvocostata* и на 10,4% – для вида *N. labradorica*. Эти показатели свидетельствуют о зарастании раковины и согласуются с отрицательными пиками  $\delta^{13}\text{C}$  по данным изотопии, приведенными в табл. 2.

Показатели рентгеновской плотности твердых включений значительно превосходят показатели рентгеновской плотности раковин образцов для каждой группы. Предварительные результаты ЭДС [21], проведенные по раковинам из аналогичных горизонтов, показали, что

Таблица 2

**Вариации значений  $\delta^{13}\text{C}$  в раковинах бентосных фораминифер в колонке LV-50-05 [22]**

Глубина, см	Вид	Размер раковин, мм	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰ VPDB
20–25	<i>U. parvocostata</i>	1	–0,93
20–25	<i>N. labradorica</i>	0,35–0,6	–2,13
470–475	<i>U. parvocostata</i>	1	–3,47
470–475	<i>N. labradorica</i>	0,5	–23,70

сферические включения представлены пиритом. Это позволяет предположить аналогичный состав включений, выявленных микротомографом. Средний объем твердых включений в раковинах вида *U. parvocostata* в горизонте осадков 20–25 см в 4 раза превышает показатели для образцов горизонта осадков 470–475 см. У раковин вида *N. labradorica*, наоборот, средний объем твердых включений из образцов горизонта осадков 470–475 см менее чем в 2 раза превышает средний объем включений из горизонта осадков 20–25 см.

## Выводы

Микротомография является перспективным дополнением к традиционным методам микропалеонтологического анализа. Ее основное преимущество заключается в возможности визуализировать внутреннее пространство раковины, не нарушая ее целостности и структуры. Томографические изображения выполнены по шкале 256 градаций серого цвета, отражающей рентгеновскую плотность вещества. Показано, что метанпроизводный диагенетический карбонат кальция имеет рентгеновскую плотность, сходную с рентгеновской плотностью первичного карбоната кальция. Включения изображаются белым цветом как наиболее плотное для рентгеновских лучей вещество образца и предположительно являются пиритом.

В ходе исследования было выявлено:

1) у раковин вида *N. labradorica* зарастает как внешняя стенка, так и внутреннее пространство раковины, особенно интенсивно в последней камере раковины. В горизонте осадков 470–475 см среднее значение доли раковин увеличилось на 26,9%, а среднее значение доли пустоты внутри раковины уменьшилось на 10,4%. Среднее значение объема твердых включений в раковинах горизонта 470–475 см почти в 2 раза больше, чем в горизонте 20–25 см;

2) раковины вида *U. parvocostata* менее подвержены зарастанию, аутигенный карбонат наблюдается только на внешних стенках камер раковины. Среднее значение доли раковин для горизонта осадков 470–475 см увеличивается на 6,5%, а среднее значение доли пустоты внутри раковины уменьшается на 6,3%. Среднее значение объема твердых включений в раковинах горизонта осадков 20–25 см в 4 раза больше, чем в горизонте осадков 470–475 см.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зоненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Баранов Б.В., Кузнецов А.П., Кузин В.С., Кузьмин М.И., Авдейко Г.П., Стунжас П.А., Лукашин В.Н., Бараш М.С., Валяшко Г.М., Демина Л.Л. Подводный газовый источник в Охотском море к западу от острова Парамушир // *Океанология*. 1987. Вып. 5. С. 795–800.
2. Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д., Дуглас В.К., Кренстон Р., Лоренсон Т., Алексеев И.А., Баранова Н.С., Иванова Г.А., Казазаев В.П., Лобков В.А., Маширов Ю.Г., Наторхин М.И., Обжиров А.И., Титаев Б.Ф. Газовые гидраты Охотского моря // *Отечественная геология*. 1994. № 2. С. 190–197.
3. Обжиров, А.И. Газохимические поля и прогноз нефтегазоносности морских акваторий: специальность 04.00.13: автореф. дис. ... доктора геол.-минерал. наук. М., 1995. 38 с.
4. Hill T.M., Stott L., Valentine D.L. Isotopic evidence for the incorporation of methane-derived carbon into foraminifera from modern methane seeps, Hydrate Ridge, Northeast Pacific // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004. Vol. 68. P. 4619–4627.
5. Levin L.A. Ecology of cold seep sediments: Interactions of fauna with flow, chemistry and microbes // *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 2005. Vol. 43. P. 1–46.
6. Плетнев С.П., Аннин В.К., Ву Ю., Тарасова Т.С. Фораминиферы и изотопия ( $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$  и  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ) их раковин в местах выхода метана на восточном склоне о. Сахалин (Охотское море) // *Изв. ТИНРО*. 2014. Т. 178. С. 180–190.
7. Torres M.E., Mix A.C., Kinports K., Haley B., Klinkhammer G.P., McManus J., de Angelis M.A. Is methane venting at the seafloor recorded by  $\delta^{13}\text{C}$  of benthic foraminifera shells? // *Paleoceanography*. 2003. Vol. 18, N3. P. 1062–1074.

8. Uchida M., Ohkushi K., Kimoto K., Inagaki F., Ishimura T., Tsunogai U., Tuzino T., Shibata Y. Radiocarbon-based carbon source quantification of anomalous isotopic foraminifera in last glacial sediments in the western North Pacific // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2008. Vol. 9, N4. DOI: 10.1029/2006GC001558.
9. Sen Gupta B.K., Platon E., Bernhard J.M., Aharon P. Foraminiferal colonization of hydrocarbon-seep bacterial mats and underlying sediment, Gulf of Mexico slope // *J. Foram. Res.* 1997. Vol. 27, N4. P. 292–300.
10. Panieri G., Camerlenghi A., Conti S., Pini G.A., Cacho I. Methane seepages recorded in benthic foraminifera from Miocene seep carbonates, Northern Apennines (Italy) // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* 2009. Vol. 284. P. 271–282.
11. Kennett J., Cannariato K., Hendy I., Behl R. Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials // *Science.* 2000. Vol. 288. P. 128–133.
12. Rathburn A.E., Levin L., Held Z., Lohmann K.C. Benthic foraminifera associated with cold methane seeps on the northern California margin: Ecology and stable isotopic composition // *Mar. Micropaleontol.* 2000. Vol. 38. P. 247–266.
13. Rathburn A.E., Perez M.E., Martin J.B., Day S.A., Mahn C., Gieskes J., Ziebis W., Williams D., Bahls A. Relationship between the distribution and stable isotopic composition of living benthic foraminifera and cold methane seep biogeochemistry in Monterey Bay, California // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2003. Vol. 4. 1106. DOI: 10.1029/2003GC000595.
14. Леин А.Ю. Аутигенное карбонатообразование в океане // *Литология и полезные ископаемые.* 2004. № 1. С. 3–35.
15. Panieri G., Aharon P., Sen Gupta B.K., Camerlenghi A., Ferrer F.P., Cacho I. Late Holocene foraminifera of Blake Ridge Diapir: Assemblage variation and stable-isotope record in gas-hydrate bearing sediments // *Mar. Geol.* 2014. Vol. 353. P. 99–107.
16. Логвина Е.А., Крылов А.А., Матвеева Т.В., Максимов Ф.Е., Кузнецов В.Ю. Аутигенез карбонатов в отложениях газогидратоносной структуры ХАОС (Охотское море) // *Вестник СПбГУ. Науки о Земле.* 2022. Т. 67, № 1. С. 50–73. DOI: 10.21638/spbu07.2022.103.
17. Panieri G., Graves C., James R. Paleo-methane emissions recorded in foraminifera near the landward limit of the gas hydrate stability zone offshore western Svalbard // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2016. Vol. 17, N2. P. 521–537. DOI: 10.1002/2015GC006153.
18. Lucas D. Mouro, Lucas D. Vieira, Anderson C. Moreira, Enelise Katia Piovesan, Celso P. Fernandes, Gerson Fauth, Rodrigo S. Horodisky, Renato Pirani Ghilardi, Iara F. Mantovani, Simone Baecker-Fauth, Guilherme Krahl, Breno Leitão Waichel, Mateus Souza da Silva. Testing the X-ray computed microtomography on microfossil identification: An example from Sergipe-Alagoas Basin, Brazil // *Journal of South American Earth Sciences.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103074>
19. Michael Siccha, Raphaël Morard, Julie Meilland, Shinya Iwasaki, Michal Kucera, Katsunori Kimoto. Collection of X-ray micro computed tomography images of shells of planktic foraminifera with curated taxonomy // *Scientific Data.* 2023. Vol.10. P. 679. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02498-0>
20. Iwasaki S., Kimoto K., Okazaki Y., Ikehara M. X-ray micro-CT scanning of tests of three planktic foraminiferal species to clarify dissolution process and progress // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2019. P. 6051–6065. <https://doi.org/10.1029/2019GC008456>
21. Романова А.В., Утюпин Л.О., Плетнев С.П., Поселюжная А.В. Вторичная карбонатная минерализация раковин фораминифер в условиях голоценовых палеоэмиссий метана в Охотском море // *Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: материалы VI Всероссийской конференции с международным участием.* Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2023. С. 173–176. <https://doi.org/10.24866/7444-5547-7>
22. Плетнев С.П., Юньхуа Ву, Романова А.В., Аннин В.К., Уткин И.В., Верещагина О.Ф. Негативные экскурсы  $\delta^{13}\text{C}$  раковин бентосных фораминифер: голоценовая история метановых событий в центральной части Охотского моря // *Геология и геофизика.* 2020. Т. 61, № 4. С. 527–545.

## REFERENCES

1. Zonenshain L.P., Murdmaa I.O., Baranov B.V., Kuznetsov A.P., Kuzin V.S., Kuz'min M.I., Avdeiko G.P., Stunzhas P.A., Lukashin V.N., Barash M.S., Valyashko G.M., Demina L.L. Podvodnyi gazovyi istochnik v Okhotskom more k zapadu ot ostrova Paramushir = [Underwater gas source in the Sea of Okhotsk west of Paramushir Island]. *Oceanology.* 1987;5:795–800. (In Russ.).

2. Solov'ev V.A., Ginsburg G.D., Duglas V.K., Krenston R., Lorenson T., Alekseev I.A., Baranova N.S., Ivanova G.A., Kazazaev V.P., Lobkov V.A., Mashirov Yu.G., Natorkhin M.I., Obzhairov A.I., Titaev B.F. Gazovye gidraty Okhotskogo morya = [Gas hydrates of the Sea of Okhotsk]. *Otechestvennaya Geologiya*. 1994;(2):190–197. (In Russ.).
3. Obzhairov A.I. Gazokhimicheskie polya i prognoz neftegazonosnosti morskikh akvatorii = [Gas-chemical fields and prediction of oil and gas content in offshore areas]: specialty 04.00.13: abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy. Moscow; 1995. 38 p. (In Russ.).
4. Hill T.M., Stott L., Valentine D.L. Isotopic evidence for the incorporation of methane-derived carbon into foraminifera from modern methane seeps, Hydrate Ridge, Northeast Pacific // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004;68:4619–4627.
5. Levin L.A. Ecology of cold seep sediments: Interactions of fauna with flow, chemistry and microbes. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 2005;43:1–46.
6. Pletnev S.P., Annin V.K., Vu Yu., Tarasova T.S. Foraminifery i izotopiya ( $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$  i  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ) ikh rakovin v mestakh vykhoda metana na vostochnom sklone o. Sakhalin (Okhotskoe more) = [Foraminifera and isotopy ( $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$  and  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ) of their shells at methane vent sites on the eastern slope of Sakhalin Island (Sea of Okhotsk). Sakhalin Island (Sea of Okhotsk)]. *Izvestiya TINRO*. 2014;178:180–190. (In Russ.).
7. Torres M.E., Mix A.C., Kinports K., Haley B., Klinkhammer G.P., McManus J., de Angelis M.A. Is methane venting at the seafloor recorded by  $\delta^{13}\text{C}$  of benthic foraminifera shells? *Paleoceanography*. 2003;18(3):1062–1074.
8. Uchida M., Ohkushi K., Kimoto K., Inagaki F., Ishimura T., Tsunogai U., Tuzino T., Shibata Y. Radiocarbon-based carbon source quantification of anomalous isotopic foraminifera in last glacial sediments in the western North Pacific. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2008;9(4). DOI: 10.1029/2006GC001558.
9. Sen Gupta B.K., Platon E., Bernhard J.M., Aharon P. Foraminiferal colonization of hydrocarbon-seep bacterial mats and underlying sediment, Gulf of Mexico slope. *J. Foram. Res.* 1997;27(4):292–300.
10. Panieri G., Camerlenghi A., Conti S., Pini G.A., Cacho I. Methane seepages recorded in benthic foraminifera from Miocene seep carbonates, Northern Apennines (Italy). *Palaeogeography. Palaeoclimatology. Palaeoecology*. 2009;284:271–282.
11. Kennett J., Cannariato K., Hendy I., Behl R. Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials. *Science*. 2000;288:128–133.
12. Rathburn A.E., Levin L., Held Z., Lohmann K.C. Benthic foraminifera associated with cold methane seeps on the northern California margin: Ecology and stable isotopic composition. *Mar. Micropaleontol.* 2000;38:247–266.
13. Rathburn A.E., Perez M.E., Martin J.B., Day S.A., Mahn C., Gieskes J., Ziebis W., Williams D., Bahls A. Relationship between the distribution and stable isotopic composition of living benthic foraminifera and cold methane seep biogeochemistry in Monterey Bay, California. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2003;4. 1106. DOI: 10.1029/2003GC000595.
14. Lein A.Yu. Autigennoe karbonatobrazovanie v okeane = [Authigenic carbonate formation in the ocean]. *Lithology and Mineral Resources*. 2004;(1):3–35. (In Russ.).
15. Panieri G., Aharon P., Sen Gupta B.K., Camerlenghi A., Ferrer F.P., Cacho I. Late Holocene foraminifera of Blake Ridge Diapir: Assemblage variation and stable-isotope record in gas-hydrate bearing sediments. *Mar. Geol.* 2014;353:99–107.
16. Logvina E.A., Krylov A.A., Matveeva T.V., Maksimov F.E., Kuznetsov V.Yu. Autigenез karbonatov v otlozheniyakh gazogidratonosnoi struktury KHAOS (Okhotskoe more) = [Authigenesis of carbonates in the deposits of the gas-hydrate-bearing structure of the CHAOS (sea of Okhotsk)]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2022;67(1):50–73. (In Russ.). DOI: 10.21638/spbu07.2022.103.
17. Panieri G., Graves C., James R. Paleo-methane emissions recorded in foraminifera near the landward limit of the gas hydrate stability zone offshore western Svalbard. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2016;17(2):521–537. DOI: 10.1002/2015GC006153.
18. Lucas D. Mouro, Lucas D. Vieira, Anderson C. Moreira, Enelise Katia Piovesan, Celso P. Fernandes, Gerson Fauth, Rodrigo S. Horodisky, Renato Pirani Ghilardi, Iara F. Mantovani, Simone Baecker-Fauth, Guilherme Krahl, Breno Leitˆao Waichel, Mateus Souza da Silva. Testing the X-ray computed microtomography on microfossil identification: An example from Sergipe-Alagoas Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103074>

19. Michael Siccha, Raphaël Morard, Julie Meilland, Shinya Iwasaki, Michal Kucera, Katsunori Kimoto. Collection of X-ray micro computed tomography images of shells of planktic foraminifera with curated taxonomy. *Scientific Data*. 2023;10:679. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02498-0>
20. Iwasaki S., Kimoto K., Okazaki Y., Ikehara M. X-ray micro-CT scanning of tests of three planktic foraminiferal species to clarify dissolution process and progress. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019;20:6051–6065. <https://doi.org/10.1029/2019GC008456>
21. Romanova A. V., Utyupin L. O., Pletnev S. P., Poselyuzhnaya A. V. Vtorichnaya karbonatnaya mineralizatsiya rakovin foraminifer v usloviyakh golotsenovykh paleoemissii metana v Okhotskom more = [Secondary carbonate mineralization of foraminifera shells under Holocene methane paleoemissions in the Sea of Okhotsk]. In: Proceedings of the VI All-Russian Conference with International Participation *Geological Processes in Subduction, Collision and Sliding of Lithospheric Plates*. Vladivostok: Far East Federal University; 2023. P. 173–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/7444-5547-7>
22. Pletnev S. P., Yonghua Wu, Romanova A. V., Annin V. K., Utkin I. V., Vereshchagina O. F. Negativnye ehkursy  $\delta^{13}\text{C}$  rakovin bentosnykh foraminifer: golotsenovaya istoriya metanovykh sobytii v tsentral'noi chasti Okhotskogo morya = [Negative  $\delta^{13}\text{C}$  excursions in foraminiferal records: the holocene history of methane events in the central sea of okhotsk]. *Geology and Geophysics*. 2020;6(4):527–545. (In Russ.).