

**ПРОЯВЛЕНИЯ АУТИГЕННОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВДОЛЬ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО
СКЛОНА ЯПОНСКОГО МОРЯ И В ТАТАРСКОМ ПРОЛИВЕ
(МАТЕРИАЛЫ 61 РЕЙСА НИС «АКАДЕМИК ОПАРИН»)**

Т.С. Якимов, Р.Б. Шакиров, Н.С. Сырбу, А.О. Холмогоров, А.В. Сорочинская

*ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43,
г. Владивосток, 690041; e-mail: syrbu@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 19 августа 2022 г.

Во время комплексной научно-исследовательской экспедиции на НИС «Академик Опарин» (рейс № 61) в Японском море с помощью гравитационного пробоотборника были обнаружены карбонатные конкреции, впоследствии определены как псевдоморфозы глендонита по икаиту. В статье представлены результаты электронно-зондовых и томографических исследований аутигенных карбонатов и газогеохимические особенности вмещающих осадков вдоль континентального склона Японского моря и в Татарском проливе.

Ключевые слова: икаит, глендонит, конкреция, метан, Японское море, Татарский пролив.

ВВЕДЕНИЕ

С позиции фундаментальных и поисковых исследований большое значение имеют образование специфических ассоциаций химических элементов и парагенезисы аутигенных минералов в пределах участков морского дна с выходами природных газов в верхнем слое осадочной толщи [1–3, 8, 15, 18, 43].

Аутигенные субаквальные карбонаты считаются одними из наиболее важных индикаторов проявления газовых потоков (активных и палеосипов) в океане. Биогеохимический процесс их образования поддерживает равновесие в углекислотной системе литосфера-океан-атмосфера и баланс углерода и кальция на планете [14, 15, 17]. Среди карбонатных образований давно известны устойчивые формы – глендониты (синонимы: геннойши, «беломорские рогульки» и т.д.), образующие конкреции, корки, стяжения из кальцита, магниезального кальцита, арагонита [5, 10, 11]. Изучение условий образования глендонитов позволяет реконструировать палеотемпературные режимы формирования вмещающих их осадков более древних эпох [41].

Глендониты в морских отложениях известны во многих районах в высоких широтах Северного и Южного полушарий, начиная с неопротерозойских до современных [6, 13, 28, 29, 31, 33, 35, 41]. На шельфе Японского моря они встречаются в позднеплейстоцен-голоценовых отложениях с высокими концент-

рациями метана (до 13 % об.). Масс-спектрометрические, рентгенофотоэлектронные спектроскопические, микроскопические, томографические и рентгенофазовые исследования позволили нам ранее установить 3 минерала в конкрециях Японского моря: икаит, ватерит и глендонит [24]. Результаты обнаружений новых конкреций глендонитов и икаита в Японском море отражены в публикации М. Рогова с соавторами [41].

Было установлено, что наиболее интенсивное образование карбонатов в Охотском море наблюдается именно в местах выходов свободных газов [20]. В глобальном масштабе аутигенные карбонаты и газогидраты оказывают значительное влияние на цикл углерода благодаря способности накапливать его гигантские количества [27, 31].

По литературным источникам [11, 29, 30, 42], широко распространено предположение об образовании глендонитов в результате псевдоморфного замещения кальцитом кристаллов икаита, ввиду сходства морфологии и близких значений изотопного состава углерода и кислорода. Икаит представляет собой метастабильный аутигенный минерал, образуется в морских осадках при температурах, близких к заморзанию (до -1 °С), преимущественно за счет деструкции органического вещества. При температуре выше +4-5 °С кристаллы икаита разрушаются, теряют воду и превращаются в кальцитовую кашлицу. Как описано выше, морфологически глендониты сходны с икаитом и представляют собой кристаллоподобные дипирами-

дальние и звездчатые образования, часто содержащие большое количество терригенного осадка (минералы, оксиды железа, обломки раковин). Это свидетельствует об их формировании в слое рыхлого осадка [7]. Предполагается, что икаит служит индикатором потока метана [24], в свою очередь, возможно, глендонит является палеоиндикатором потока метана, поскольку является псевдоморфозой кальцита по икаиту.

Известно, что по степени влияния на радиационный баланс атмосферы и развитие парникового эффекта метан является третьим по значимости (после паров воды и двуокси углерода) парниковым газом. Согласно современным представлениям, изменения средней глобальной температуры атмосферы обусловлено парниковым эффектом и, в частности, увеличением в ней концентрации метана.

Метан обладает высокой парниковой активностью (по оценкам ученых, она, как минимум, в 25 больше, чем у углекислого газа) [12]. Более половины источников метана составляют природные источники, включая выходы потоков метана в морях и разложение газовых гидратов. Вторая половина присуща антропогенным источникам. Аутигенные карбонаты, связанные с анаэробным окислением метана (АОМ), могут быть использованы для выявления распределения во времени и пространстве потоков метана в океане и его связи с циклом углерода и изменением климата. Один из таких аутигенных карбонатных минералов, глендонит, до сих пор остается малоизученным, особенно для дальневосточных окраинных морей.

Хотя образование икаита иногда связывают с образованием метана *in situ* [32], глендониты до сих пор в основном использовались в качестве косвенной записи специфических термодинамических параметров, контролирующих образование икаита. Таким образом, глендониты могут быть использованы для документирования прошлых событий окисления метана в холодных средах.

РАЙОН РАБОТ

Станции с находками глендонитов ОР61-35GC, ОР61-40GC и ОР61-42GC приурочены к Тернейскому прогибу Южно-Татарского осадочного бассейна Татарского пролива. Татарский пролив отделяет остров Сахалин от материка, расширяясь от 50–70 км на севере до 250 км на юге. Он протягивается в меридиональном направлении на 700 км (с 46 по 52 градус северной широты), соединяясь на севере через пролив Невельского с Амурским лиманом и раскрываясь на юг в Центральную котловину Японского моря, где и образует Южно-Татарский бассейн.

Тернейский прогиб вытянут в северо-восточном направлении на расстояние 200–220 км диагональ-

но к Евразийскому материка и острову Сахалин и сложен олигоцен-четвертичными отложениями [16]. Основной очаг нефтеобразования Южно-Татарского осадочного бассейна располагается как раз-таки в прогибе, фундамент которого погружен на глубину более 8 км, поэтому в самой нижней производящей толще генерация УВ началась в раннем миоцене, миграция – в среднем миоцене [4, 25]. В настоящее время эти отложения находятся в фазе активной газогенерации [9]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С 17 ноября по 10 декабря 2020 года в Татарском проливе Японского моря проводилась комплексная научно-исследовательская экспедиция на НИС «Академик Опарин» (рейс № 61, включающая в себя геолого-геофизические, газогеохимические и океанографические исследования. Организатор экспедиции – Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток.

Осадки отбирались ударной прямооточной трубкой (длина 410 см, внутренний диаметр 90 мм) с последующим литологическим описанием. Спектрометрические и томографические исследования проводились в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа Дальневосточного геологического института ДВО РАН, г. Владивосток. Спектрометрические данные о составе карбонатных образований были получены на четырехканальном микроанализаторе Jeol JXA 8100, кристаллы-анализаторы: LiF, PET, TAP, LDE2; энергодисперсионный спектрометр INCA-sight производства Oxford Instruments (Великобритания) – аналитик А.А. Карабцов. Микротомография выполнена на микротомографе SKYSCAN 1272, аналитик М.А. Ушкова.

Валовый состав газовой составляющей флюидов определен методом GC-MS на газовом хромато-масс-спектрометре Focus GC/DSQ II MS (Thermo Scientific, USA) в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева в лаборатории термобарогеохимии.

Концентрация метана в осадке определялась методом равновесных концентраций («head space») на борту судна на двухканальном газовом хроматографе «КристалЛюкс 4000М» с датчиками потока ионизации и теплопроводности, чувствительностью 10–5 %. Для анализа гелия и водорода применялся газовый хроматограф «Хроматэк-Газохром 2000» (ОАО «Хроматек», г. Йошкар-Ола) с датчиками теплопроводности повышенной чувствительности (1–2 ppm по гелию и водороду).

Лаборатория геохимии Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН имеет Свидетельство Росстандарта № 58 к паспорту лаборатории ПС 1.051–21.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе комплексной научно-исследовательской экспедиции рейса 61 на НИС «Академик Опарин» были найдены карбонатные конкреции в керне на станциях OP61-40GC, OP61-41GC и OP61-35GC на континентальном склоне Японского моря в Южно-Татарском осадочном бассейне на глубине 326 м, 732 м и 823 м, в интервале 110–370 м ниже поверхности дна в пелитовом осадке предположительно плейстоцено-голоценового возраста (рис. 1). Конкреции располагались отдельно друг от друга. Данные образования обнаружены в результате промывки осадка методом шлихования.

Конкреции плотные, неразмываемые (рис. 2), оливково-серого цвета и имеют зональность, где центр сложен призматическими и игольчатыми кри-

сталлами карбоната кальция, а внешняя оболочка состоит из терригенного материала с небольшой зональностью, образованной в результате формирования (рис. 3, 4). На продольных срезах наблюдается сильная пористость. Подобные микротекстурные особенности карбонатных образований отмечены в породах разного возраста (от голоцена до карбона) и связываются с биохемогенным (бактериальным) формированием выделений карбонатов [36, 39]. Вмещающие осадки представлены пелитами оливкового цвета, где до 0.5 м – пелит с текучей консистенцией, а ниже по керну пелит плавно переходит от текучей к тугопластичной консистенции. Немаловажной особенностью керна является наличие запаха сероводорода. Конкреции имеют продолговатую, овальную, почковидную, каплевидную, грушевидную, верете-

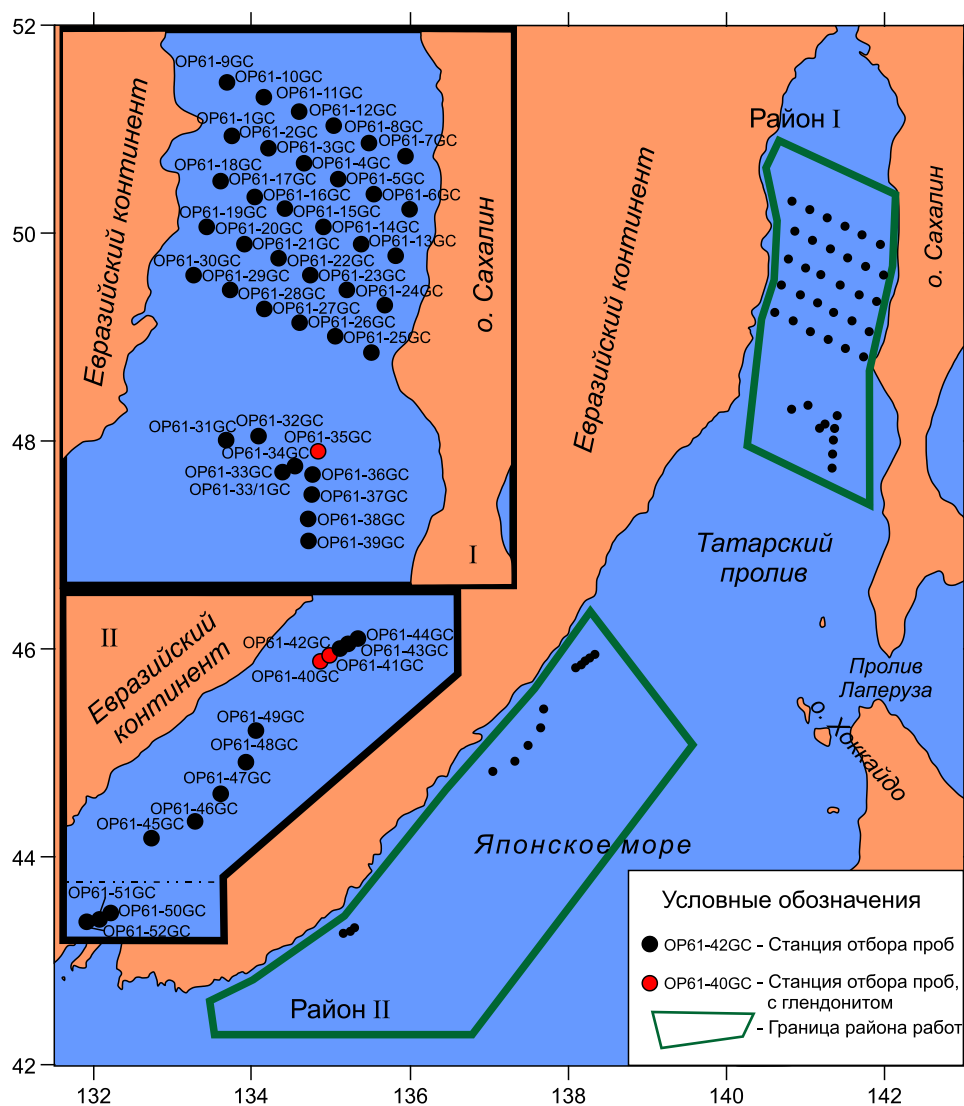


Рис. 1. Схема расположения станций по районам исследования рейса 61 НИС «Академик Опарин».

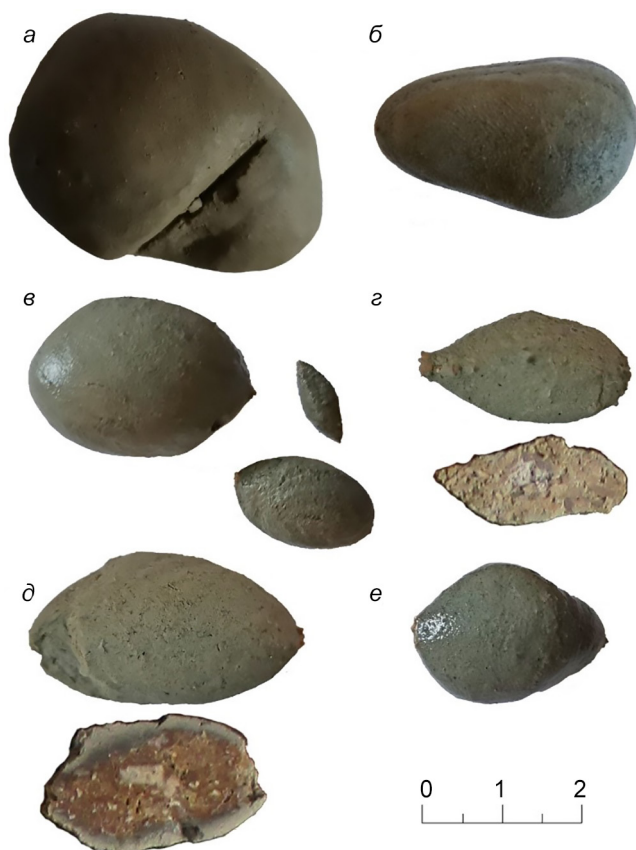


Рис. 2. Карбонатные конкреции, рейс 61 НИС «Академик Опарин». Фото Т.С. Якимов.

a – станция отбора ОР61-35GC-370; *б* – станция отбора ОР61-41GC-110; *в* – станция отбора ОР61-41GC-120; *г* – станция отбора ОР61-41GC-130; *д* – станция отбора ОР61-41GC-150; *е* – станция отбора ОР61-41GC-180.

нообразную форму с выступающими наружу псевдоморфозами глендонита по икаиту. Выступающие наружу кристаллы образца ОР61-41GC-130 имеют несколько лучей в отличие от других образцов (рис. 2). Не исключено, что псевдоморфозы имеют скелетную форму, что хорошо видно на фотографии с электронно-зондового микроанализатора (рис. 4). На образце ОР61-35GC-370 наблюдается небольшая впадина в теле конкреции до 4 мм (рис. 2, *a*).

Центральная часть у образцов сложена молочным, бежевым кальцитом. В конкреции ОР-61-41GC-130 наблюдается следующая зональность: центр – молочный кальцит, далее – розовый кальцит, внешняя оболочка – серого цвета, сложенная терригенным материалом. Конкреция ОР-61-41GC-150 имеет следующую зональность: центр – бежевый кальцит, далее – кальцит ржаво-коричневого цвета, оболочка терригенного материала – темно-серого цвета, с большей степенью литификации по сравнению с

Таблица 1. Результаты газовой хромато-масс-спектрометрии газовых включений. Отн. % – нормализованная площадь, отношение площади компонента газовой смеси к сумме площадей всех компонентов.

Летучий компонент	Относительно содержание % (отн. %)
CO ₂	37
H ₂ O	62.2
Углеводороды	0.8

каймой, и окаймляющая зона серого цвета, состоящая из терригенного материала (рис. 2, *д*, *е*).

У образца ОР61-41GC-130 наблюдается трещиноватость внутри конкреции, конкреция ОР61-41GC-150 является более плотной и менее трещиноватой модификацией, что указывает на то, что последний образец находился в более комфортных условиях генезиса.

На электронно-зондовом микроанализаторе в терригенной зоне темно-серого цвета карбонатной конкреции (рис. 3, *в*) были обнаружены многочисленные зерна пирита, на снимке представлены белыми образованиями. Пирит является ярким представителем аутигенной минерализации Японского моря. Судя по заполнению пустот и характеру распределения, пирит и кальцит имели близкое время формирования, при этом CO₂ – отн. 37 % (табл. 1) было выше, чем продуктов сульфатредукции (1.5 %).

На снимке (рис. 4, *г*) видны множественные лучистые кристаллы кальцита, что впоследствии должны были превратиться в более плотную структуру. Но ввиду малого количества кристаллизационного вещества данный минерал образовал скелетную форму.

В образце ОР61-41GC-150 с помощью электронно-зондового микроанализатора определены минералы двух типов: аутигенные (кальцит, галит и пирит); терригенные – альбит. Результаты исследований приведены в таблице 2.

Аутигенные минералы в конкреции ОР61-41GC-130 представлены только кальцитом (рис. 4), что подтверждают результаты электронно-зондового микроанализа приведенные в таблице 3.

Микротомография особенно актуальна для исследования конкреций без нарушения целостности образца, что позволяет установить характер зональности, распределение минералов, наличие пустот. На рис. 5 показаны томограммы образца ОР61-41GC-150, а на графиках представлены спектры распределения неоднородностей. На рис. 5, *в* показана нижняя часть глендонита, на которой не обнаруживается ярко выраженных пустот. В центральной части образца

Таблица 2. Результаты электронно-зондового микроанализа OP61-41GC-150.

C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Sr	Сум.	Мин.
8.63	50.78	1.17	2.28	2.91	9.42		0.41	0.34	0.82	21.99	1.23		100	Площадь
3.54	47.22	7.61		10.35	30.24			0.33	0.7				100	Альбит
8.11	43.22	5.24	4.11		0.41	0.26		2.97		35.68			100	Площадь
10.1	34.66	1.44	1.8	4.1	7.55		14.63		0.72	12.5	12.5		100	Площадь
6.89	49.46		0.93					0.47		42.25			100	Кальцит
7.78	54.9		0.46					0.1		36.76			100	Кальцит
6.61	35.31	1.34	2.49	2.59	6.06		0.24	3.01	0.93	39.95	1.48		100	Кальцит
7	48.49	3.21	3.93	0.93	1.76	0.2	0.21	1.77	0.22	31.81	0.49		100	Кальцит
7.02	51.43	1.8	0.42					1.09		38.24			100	Кальцит
7.35	49.44		3.47		0.24	0.14		0.42		38.95			100	Кальцит
6.51	49.53									43.96			100	Кальцит
5.41	45.46		3.47			0.17		0.14		45.17		0.18	100	Кальцит
8.82	22.38	12.8	3.81		0.15	0.29	0.21	7.49		43.2	0.85		100	Кальцит
4.72	43.03		5.42			0.3		0.28		46.26			100	Кальцит
8.27	27.67		8.18	7.11	11.24			0.32	0.54	1.13	35.54		100	Галит
10.04	15.58	29.74	1.99					29.06		13.59			100	Галит
14.28				0.18	0.23		46.93		0.14	0.52	37.73		100	Пирит

Таблица 3. Результаты электронно-зондового микроанализа OP-61-41GC-130.

C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Сум.	Мин.
7.55	55.36	0.68					0.18	0.19	0.19	35.86			100	Кальцит
8.19	57.67							0.13		34			100	Кальцит
7.87	54.98				1.33			0.13		35.69			100	Кальцит
7.44	48.98	0.4	0.56				0.18	0.71		41.73			100	Кальцит
6.61	35.18		1.01	0.56	1.55		0.98	0.33	0.31	52.21		1.27	100	Кальцит
7.54	49.46									43			100	Кальцит
8.11	50.94		1.34	1.32	4.71				0.6	32.7		0.29	100	Кальцит
10.62	47.98		2.99	0.43	0.64	0.25		0.19		36.9			100	Кальцит
8.61	62.05									29.34			100	Кальцит
4.62	45.84				0.83					48.03		0.68	100	Кальцит
8.55	57.18	0.63	0.62	0.22	0.29			0.17	0.2	31.94		0.21	100	Кальцит

(рис. 5, б) наблюдается более пористая структура по сравнению с другими зонами, также отмечается одна полость.

Благодаря микротомографу SKYSCAN 1272 получена 3D модель карбонатной конкреции OP61-41GC-150 (рис. 6) с последовательными профильными разрезами, на которых четко отбивается зональность, описанная выше: центр – бежевый кальцит, далее – кальцит ржаво-коричневого цвета, оболочка терригенного материала – темно-серого цвета. На рис. 7 представлены результаты изучения минералов, где, преимущественно, в центральной части обнаружены включения пирита, в меньшей степени гематита. В терригенной же части диагностируется типичные минералы: альбит и кварц.

Характер распределения пустот и трещин на томограмме в совокупности с 3D разрезом свиде-

тельствуют о том, что рост псевдоморфоз глендонита по икаиту происходил неравномерно, ввиду того, что нижняя, ориентированная к керну, часть образца сформирована с минимальным количеством пор, а в остальных частях их количество увеличено. Возможно, это связано с удержанием раствора в нижней части данного образования.

Также стоит отметить, что в рейсе 61 НИС «Академик Опарин» был обнаружен в единственном экземпляре крупный кристалл карбоната (длиной 8 см) с карбонатной оторочкой (рис. 8), что является конечным продуктом генерации изменений по икаиту.

Аутигенные карбонаты образуются при повышении карбонатной щелочности в поровых водах в результате разрушения органического вещества или за счет анаэробного окисления метана, либо за счет его генерации. Не исключено, что данные процессы мо-

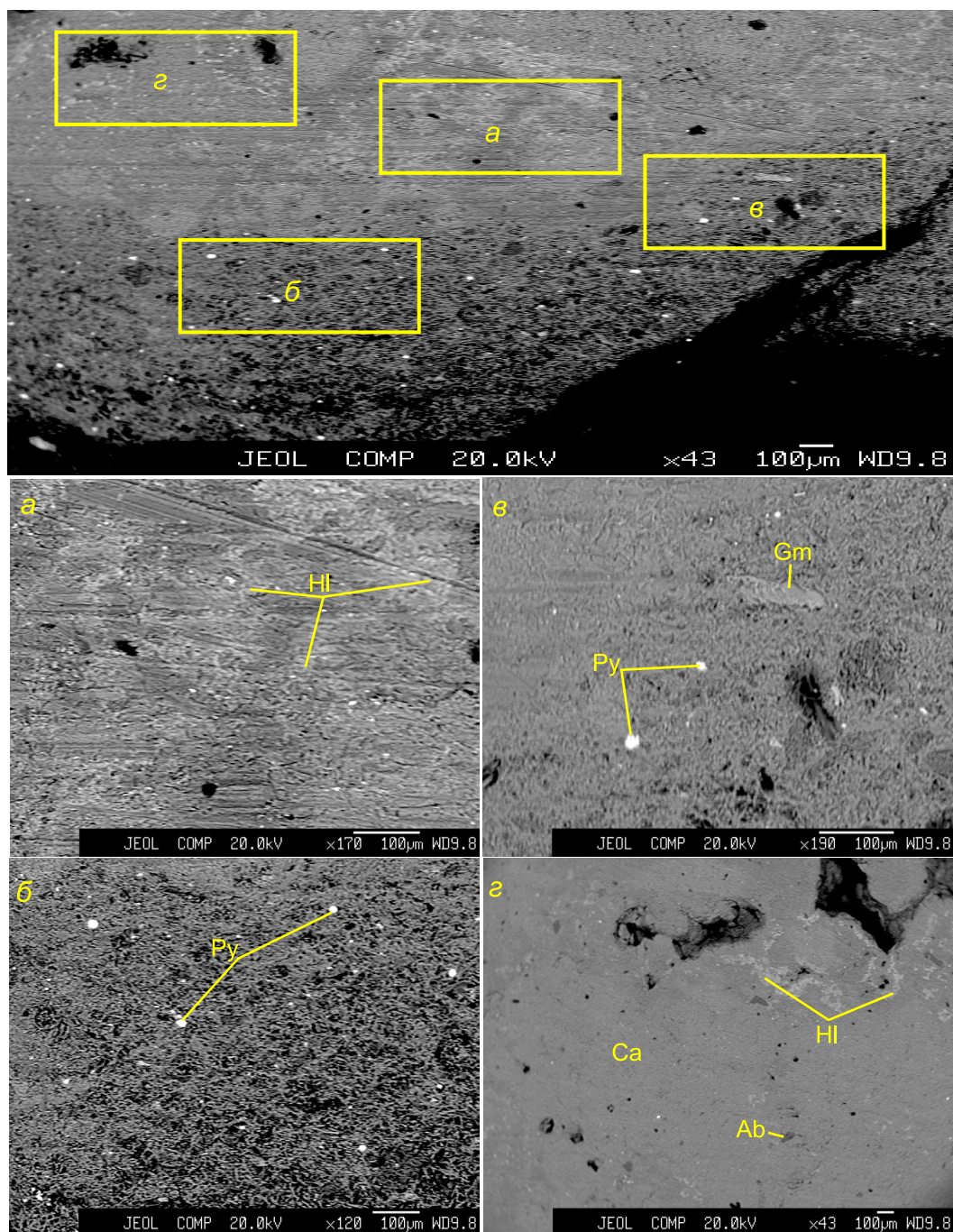


Рис. 3. Снимок карбонатной конкреции OP61-41GC-150, (электронно-зондовый микроанализатор JEOL JXA-8100, ДВГИ ДВО РАН).

а и *г* – центральные части конкреции, *б* и *в* – зоны терригенного материала. Ab – альбит, Ca – кальцит, Hl – галит, Gm – гематит, Py – пирит.

гут идти совокупно [24], на что указывают включения аутигенного пирита по всему объему образцов.

Содержание Fe до 1.5 % в псевдоморфозах указывает на наличие на момент формирования свободного Fe, что является необходимым компонентом для формирования аутигенных сульфидов.

В образце OP61-41GC-130 данные процессы проявлены слабо, поскольку это образование является более поздним, если рассматривать эволюцию глендонита по икаиту. Но это также не отменяет того факта, что все представленные образцы могли начать формироваться в одно и то же время.

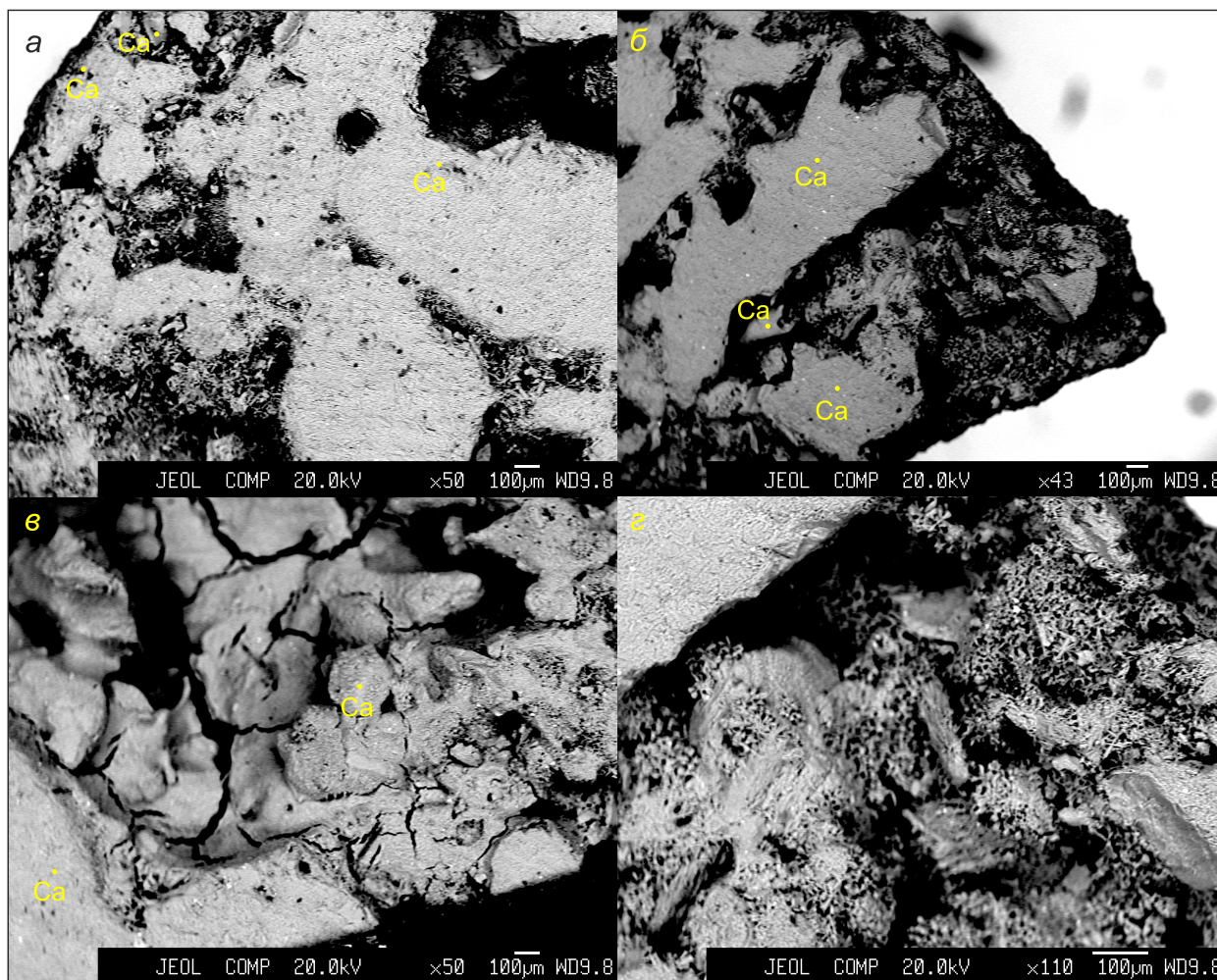


Рис. 4. Снимок карбонатной конкреции OP-61-41GC-130, (электронно-зондовый микроанализатор JEOL JXA-8100, ДВГИ ДВО РАН).

a и *б* – краевые части конкреции, *в* – центральная часть конкреции, *г* – увеличенный участок краевой части конкреции. Ca – кальцит.

Газогеохимические особенности донных осадков

Газогеохимические исследования донных отложений в ходе рейса 61 НИС «Академик Опарин» были также проведены в центральной и южной части Татарского пролива (район I) и на континентальном склоне Японского моря (район II) (рис. 1).

Проанализированы условия залегания, состав, строение и ряд внутренних микроструктур глендонитов, возникших, с точки зрения биохомогенного происхождения, за счет мобилизации газообразных углеводородов. Для района центральной части Татарского пролива этот источник мог быть связан с поступлением углеводородов из отложений докайнозойского фундамента в районах залежей газовых гидратов [9].

Ранее, в ходе исследования газогеохимических полей придонного слоя толщи вод Татарского проли-

ва, был получен ряд важных результатов [19], указывающих на наличие аномальных полей метана (концентрации до 45 нмоль/л), с точки зрения перспектив нефтегазоносности. Позже, в ходе проекта SSGH [38] выявлено, что верхняя часть осадочного разреза преимущественно в восточной части Южно-Татарского прогиба характеризуется распространением многочисленных структур газовых выходов (в иностранной литературе «chimney»). К ним, как правило, приурочены газовые факелы и проявления газогидратов в верхнем слое осадочных отложений. В районе этих структур проведены исследования распределения углеводородных газов, изотопного состава углерода метана и этана, концентраций водорода и гелия, которые позволили обнаружить в скоплениях газогидратов преобладание катагенетических газов [23]. Газогидратоносные структуры картировались главным образом

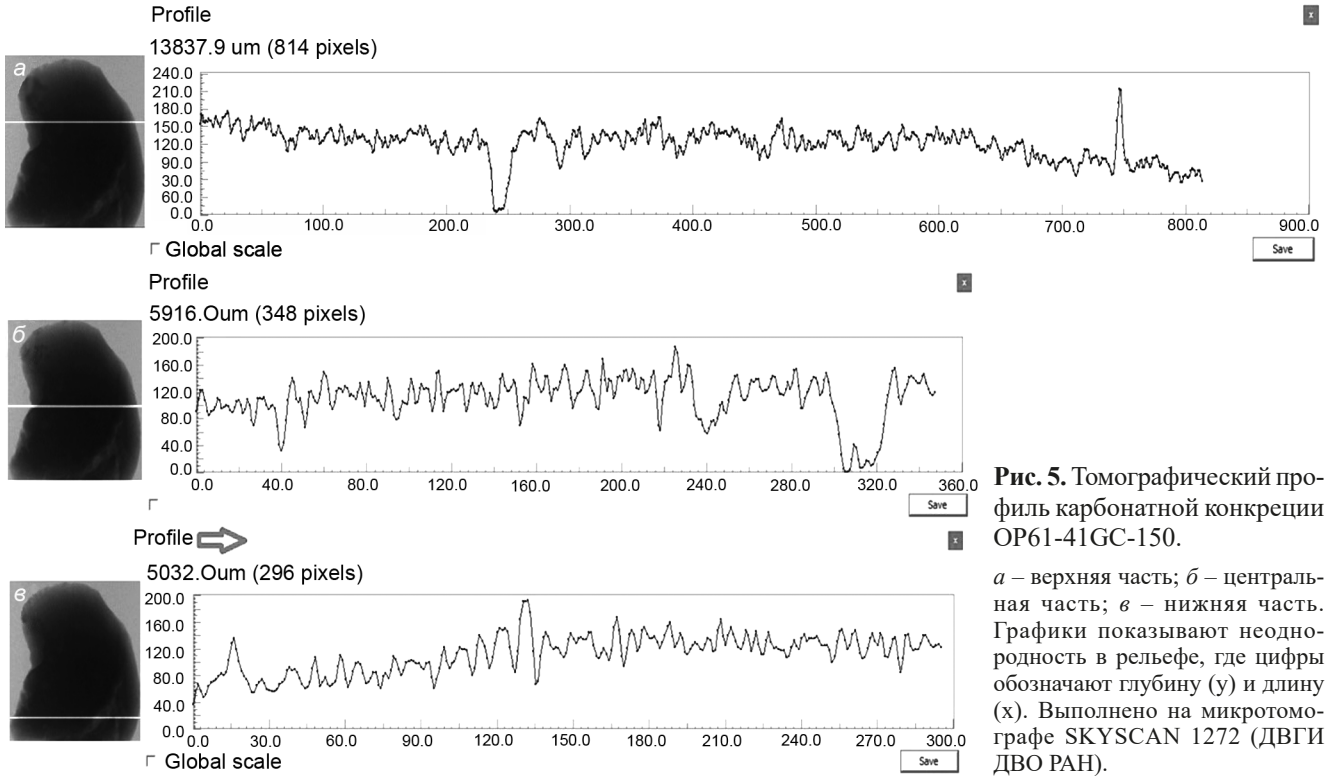


Рис. 5. Томографический профиль карбонатной конкреции ОР61-41GC-150.

a – верхняя часть; *б* – центральная часть; *в* – нижняя часть. Графики показывают неоднородность в рельефе, где цифры обозначают глубину (y) и длину (x). Выполнено на микротомографе SKYSCAN 1272 (ДВГИ ДВО РАН).

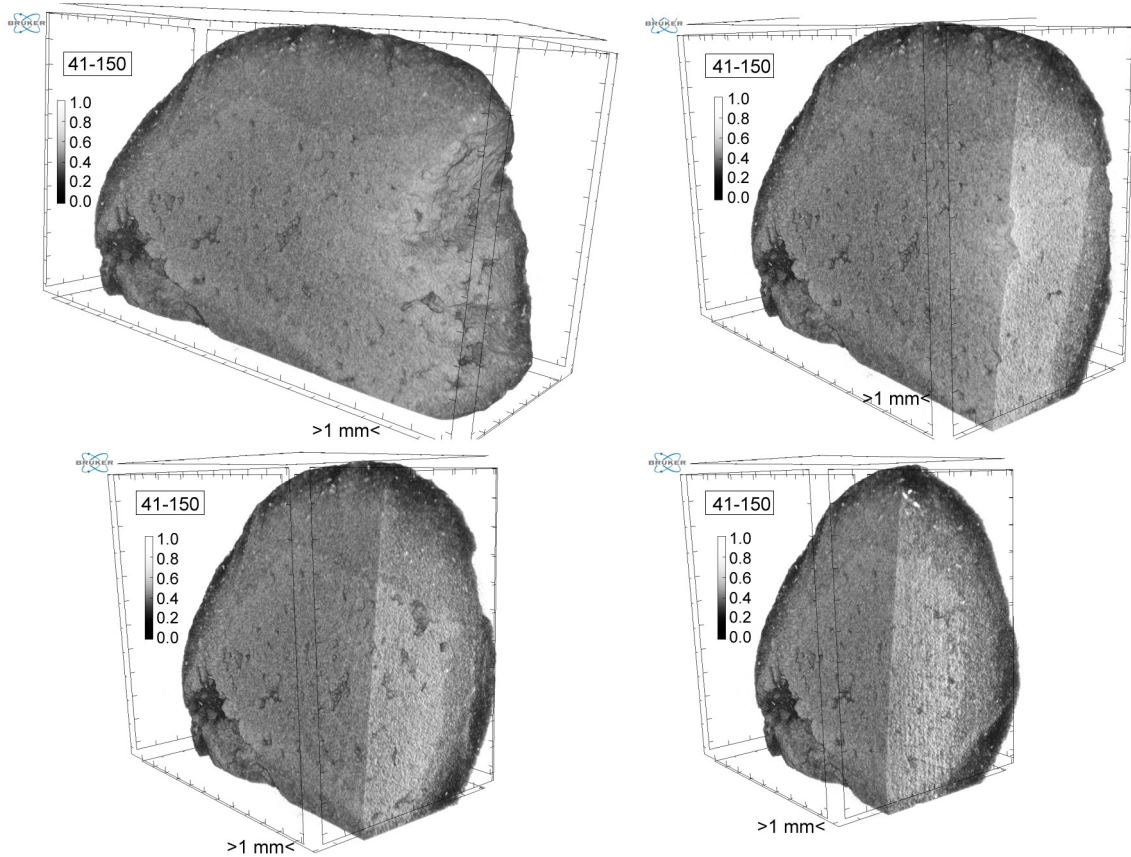


Рис. 6. 3D модель карбонатной конкреции ОР61-41GC-150 с профильными разрезами. Выполнено на микротомографе SKYSCAN 1272 (ДВГИ ДВО РАН).

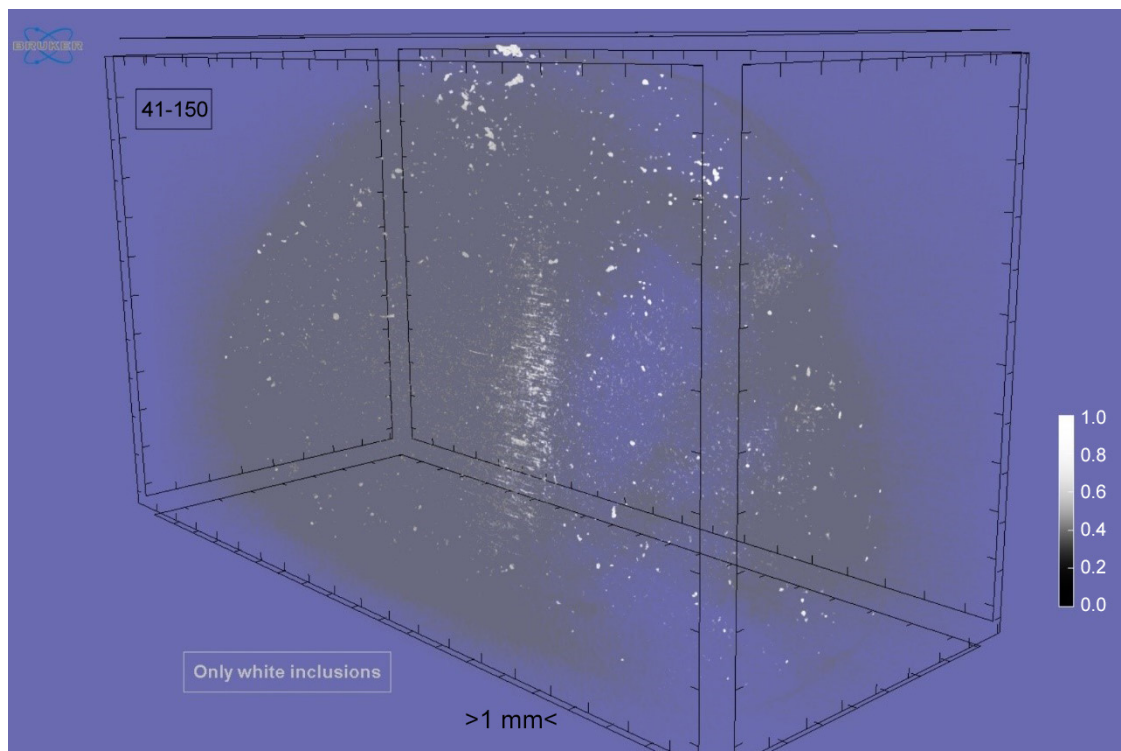


Рис. 7. Распределение включений в карбонатной конкреции OP61-41GC-150. Шкала показывает коэффициент поглощения рентгеновских лучей. Выполнено на микротомографе SKYSCAN 1272 (ДВГИ ДВО РАН).

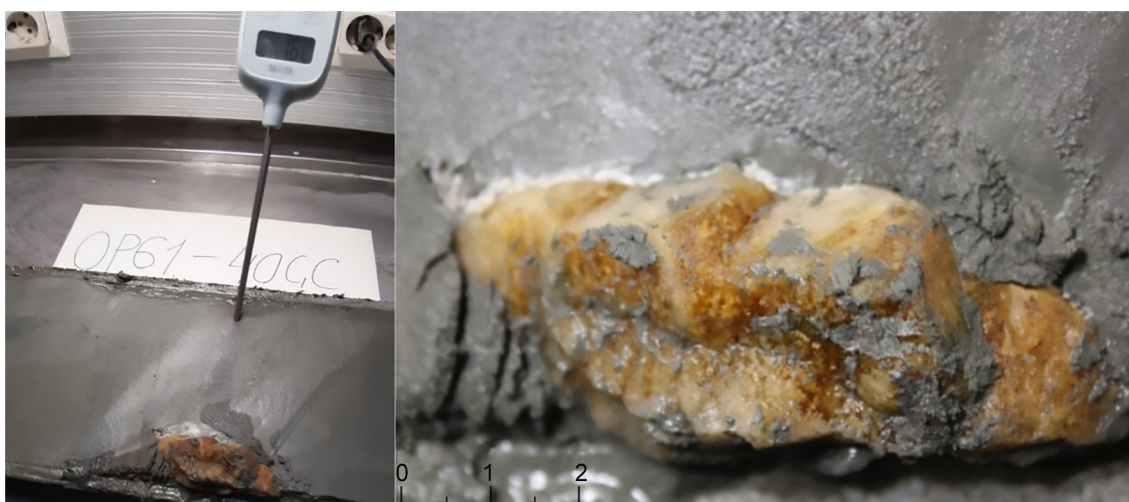
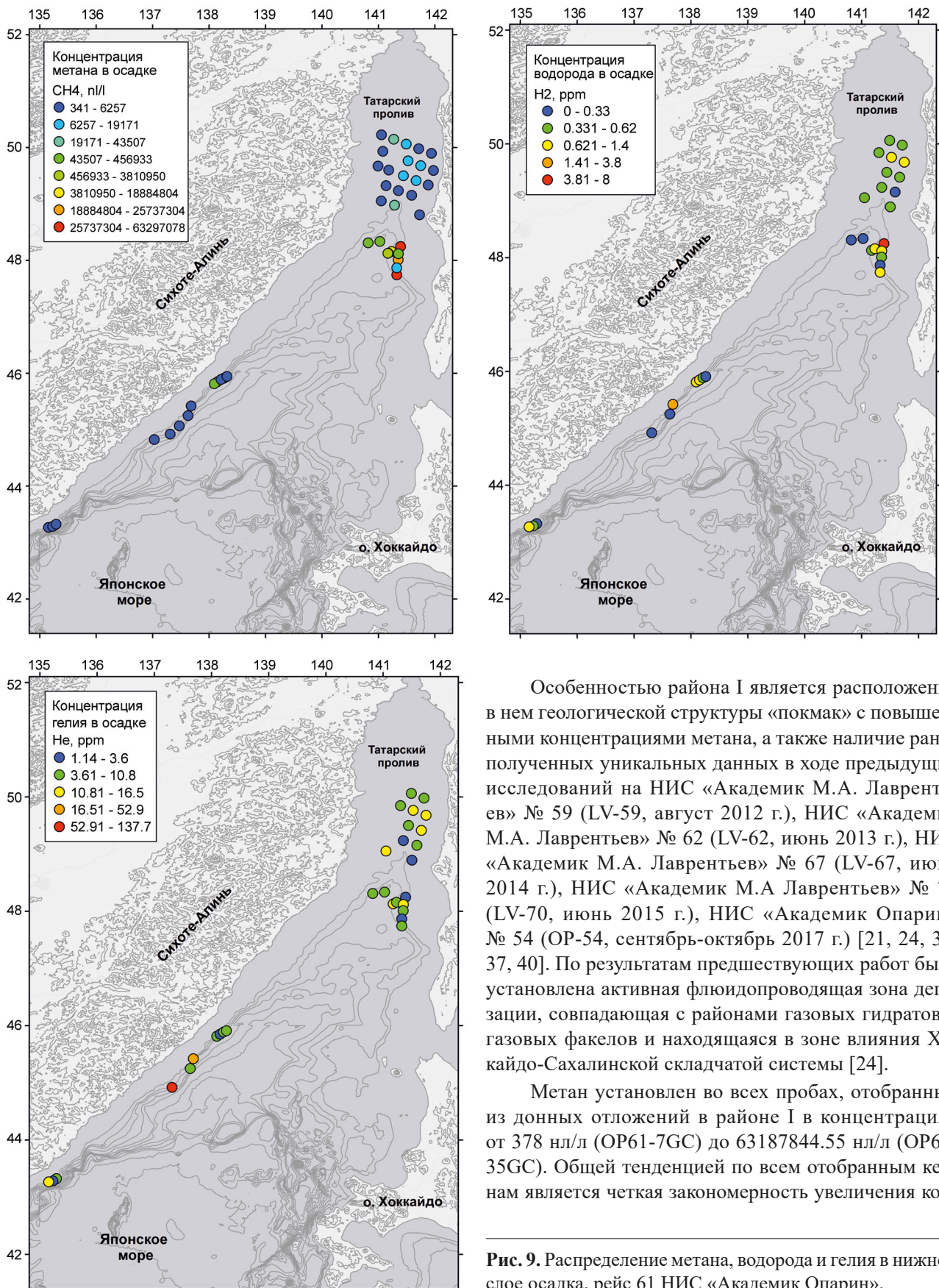


Рис. 8. Карбонат, станция OP61-40GC. Фото В.Ю. Калгин. На термометре указана температура керна 1.6 °С, поднятого со дна.

в области склона о. Сахалин [22, 38], т.е. на восточном борту Южно-Татарского прогиба. Эти и другие особенности Южно-Татарского осадочного бассейна указывают на то, что он должен являться активным поставщиком метана из донных отложений не только в толщу вод, но и в атмосферу.

В ходе рейса 61 НИС «Академик Опарин» было изучено 52 керна осадочных отложений, показавших

неравномерное распределение углеводородных газов, а также гелия и водорода (рис. 9). В пределах газовых выходов во многих кернах осадков зафиксированы признаки газонасыщения, максимальные концентрации метана до 63187844.55 нл/л (OP61-35GC), проявления аутигенной карбонатной минерализации, обнаруженные в сильно газонасыщенном керне станции OP61-35GC.



Особенностью района I является расположение в нем геологической структуры «покмак» с повышенными концентрациями метана, а также наличие ранее полученных уникальных данных в ходе предыдущих исследований на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 59 (LV-59, август 2012 г.), НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 62 (LV-62, июнь 2013 г.), НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 67 (LV-67, июнь 2014 г.), НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 70 (LV-70, июнь 2015 г.), НИС «Академик Опарин» № 54 (OP-54, сентябрь-октябрь 2017 г.) [21, 24, 34, 37, 40]. По результатам предшествующих работ была установлена активная флюидопроводящая зона дегазации, совпадающая с районами газовых гидратов и газовых факелов и находящаяся в зоне влияния Хоккайдо-Сахалинской складчатой системы [24].

Метан установлен во всех пробах, отобранных из донных отложений в районе I в концентрациях от 378 нл/л (OP61-7GC) до 63187844.55 нл/л (OP61-35GC). Общей тенденцией по всем отобранным кернам является четкая закономерность увеличения кон-

Рис. 9. Распределение метана, водорода и гелия в нижнем слое осадка, рейс 61 НИС «Академик Опарин».

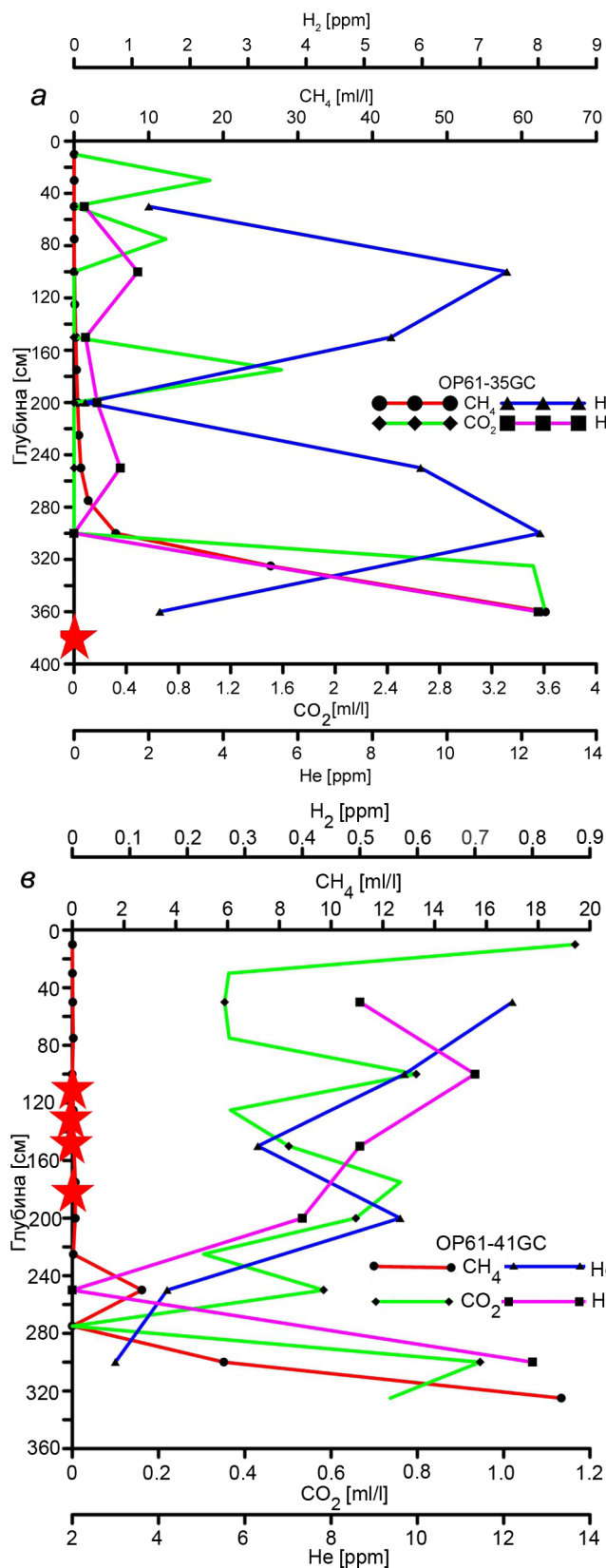
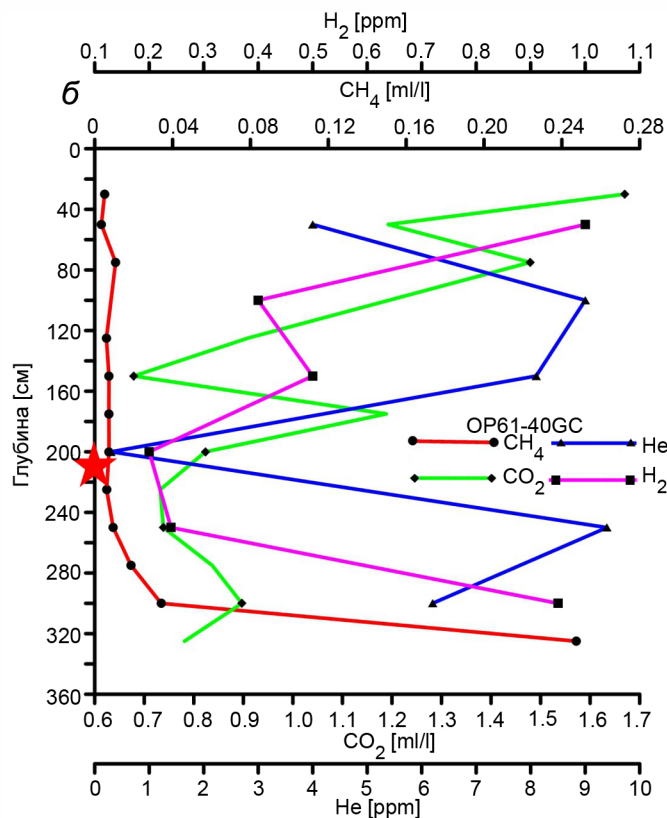


Рис. 10. Распределение метана, углекислого газа, гелия и водорода в керне осадка на станциях OP61-35GC (а), OP61-40GC (б) и OP61-41GC (в), рейс 61 НИС «Академик Опарин». Звездой отмечена положение глендонита.



центраций метана с глубиной опробования. Обнаружены также положительные корреляционные связи с этаном и пропаном. Градиент возрастания концентраций был максимальным в кернах, содержащих газоидраты и газонасыщенные слои осадка.

На рис. 10, а показано распределение метана, углекислого газа, гелия и водорода в керне осадка на станции OP61-35GC в районе газовых выходов, где были обнаружены карбонатные аутогенные образования. Концентрации метана, углекислого газа и водорода на всей длине керна увеличиваются к забю и после горизонта 300 см наблюдается резкое увеличение градиента в несколько раз.

Карбонатные конкреции также были найдены в кернах станций OP61-40GC и OP61-41GC на континентальном склоне Японского моря на глубине 748 м и 932 м, соответственно, в интервале 130–150 см ниже поверхности дна в пелитовом осадке предположительно плейстоцен-голоценового возраста [5]. Минимальная концентрация метана – 747 нл/л (OP61-49GC, горизонт 50 см.), максимальная – 18 884 804 нл/л (OP61-41GC, горизонт 350 см).

В этом же районе в рамках рейсах 81 на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» впервые был поднят икаит (LV81-59GC) в газогеохимических зонах метановой аномалии, приуроченной к разломной зоне [35].

На рис. 10, б, в показано распределение метана, углекислого газа, гелия и водорода в керне осадка с обнаруженными аутигенными минералами на станциях ОР61-40GC и ОР61-41GC.

Высокие концентрации метана и гелия на одних и тех же участках могут указывать на существование глубинных зон проницаемости, а также быть индикаторами углеводородного флюида (рис. 10, в). В результате исследований содержания гелия и водорода на континентальном склоне Японского моря (Приморский край) в районах газонасыщенных структур выявлено, что в приповерхностном слое осадков содержание гелия носит весьма изменчивый характер. Неравномерное распределение гелия со средними вариациями от 2 до 200 ppm в кернах осадков может указывать на колебания динамики восходящего потока газов.

На острове Сахалин, на участках, близких к районам работ 61-ого рейса НИС «Академик Опарин», высокие концентрации гелия были обнаружены авторами в свободном газе Южно-Сахалинского грязевого вулкана (до 59 ppm), а также в минеральных холодных источниках вблизи г. Холмск (до 229 ppm растворенного в воде гелия) и газах, растворенных в воде в источниках на юго-западном побережье о. Сахалин в окрестностях г. Невельск (до 342 ppm). Для сравнения атмосферный фон по гелию составляет 5 ppm [26].

Полученные данные распределения газов в осадке позволяют предположить, что миграция газа из осадочной толщи к поверхности проходит по разломам и имеет пульсационный характер, что отражается в активности газовых факелов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Газогеохимические исследования донных осадков Южно-Татарского осадочного бассейна и континентального склона северной части Японского моря позволяют говорить о ведущей роли биогеохимических процессов в образовании глендонитов в районах метановых сипов из газогидратных залежей или скоплений природного газа в подстилающих толщах, что указывает на углеводородный потенциал шельфа и материкового склона. Также стоит отметить, в исключительной экономической зоне РФ в Японском море глендониты практически не изучены. Тем не менее, благодаря работам ТОИ ДВО РАН в экспедициях 2017–2020 гг. установлено, что вдоль континентального склона Японского моря, сопряженного с Приморским краем, существуют неизвестные ранее протяженные зоны метановой дегазации. Эти зоны, в том числе, маркируются уникальными по своим характеристикам аутигенными проявлениями карбонатной минерализации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам Приморского центра локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН А.А. Карабцову и М.А. Ушковой, а также начальнику экспедиции – заведующему лаборатории гравиметрии к.г.-м.н. М.Г. Валитову.

Исследования выполнены в рамках государственной темы ТОИ ДВО РАН АААА-А19-119122090009-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахова Н.В., Липкина М.И., Мельниченко Ю.И. Гидротермальная баритовая минерализация во впадине Дерюгина, Охотское море // Докл. АН. 1987. Т. 295, № 1. С. 212–215.
2. Астахова Н.В., Нарнов Г.А., Якушева И.Н. Карбонат-баритовая минерализация во впадине Дерюгина (Охотское море) // Тихоокеан. геология. 1993. № 3. С. 37–42.
3. Астахова Н.В., Обжиров А.И., Астахов А.С., Горбаренко С.А. Аутигенные карбонаты в зонах газовых аномалий окраинных морей Востока Азии // Тихоокеан. геология. 1993. № 4. С. 34–40.
4. Берсенева И.И., Леликов Е.П., Безверхний В.Л., Ващенко Н.Г., Съедин В.Т., Терехов Е.П., Цой И.Б. (1987). Геология дна Японского моря.
5. Бродская Н.Г., Рентгартен Н.В. Органогенная природа диагенетических образований типа «геннойши» // Проблемы литологии и геохимии осадочных пород и руд. М.: Наука, 1975. С. 312–322.
6. Гептнер А.Р., Покровский Б.Г., Садчикова Т.А и др. Локальная карбонатизация осадков Белого моря (концепция микробиологического образования) // Литология и полез. ископаемые. 1994. № 5. С. 3–22.
7. Гептнер А.Р. Биохеогенные карбонаты (глендониты) в осадках Белого моря – возможный индикатор зоны дегазации углеводородов // Природа шельфов и архипелагов Европейской Арктики. М.: ГЕОС, 2010. Вып. 10. С. 56–63.
8. Деркачев А.Н., Николаева Н.А. Минералогические индикаторы обстановок приконтинентального осадкообразования западной части Тихого океана / Ред. А.И. Обжиров. Владивосток: Дальнаука, 2010. 321 с.
9. Жемчугова Т.А. Нефтегазоносный потенциал кайнозойских отложений в центральной части Татарского пролива // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2013. № 2. С. 69–75.
10. Захарова М.А. Литология палеогеновых отложений Сахалина и условия их образования. Новосибирск: Наука, 1973. 108 с.
11. Каплан М.Е. Кальцитовые псевдоморфозы (псевдогейлюсит, яровит, тинолит, глендонит, геннойши, беломорские рогульки) в осадочных породах. Происхождение псевдоморфоз // Литология и полез. ископаемые. 1979. № 5. С. 125–140.
12. Киселев А.А., Кароль И.Л. Еще раз про метан // Природа. 2015. № 11. С. 9–17.
13. Кравчишина М.Д., Лейн А.Ю., Саввичев А.С., Рейхард Л.Е., Дара О.М., Флинт М.В. Аутигенный Mg-кальцит на метановом полигоне в море Лаптевых. 2017. «Океанология». DOI:10.7868/S0030157417010063

14. Леин А.Ю., Сагалевиц А.М. Курильщики поля Рейнбоу – район масштабного абиогенного синтеза метана // Природа. 2000. № 8. С. 44–53.
15. Леин А.Ю. Аутигенное карбонатообразование в океане // Литология и полез. ископаемые. 2004. № 1. С. 1–35
16. Нечаюк А.Е. Геологическое строение и динамика формирования осадочных бассейнов Татарского пролива и Западного Сахалина: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Владивосток: ДВГИ ДВО РАН. 2017. с. 29.
17. Николаева Н.А., Деркачев А.Н., Обжиров А.И., Сорочинская А.В. Минералого-геохимические признаки формирования и деградации газовых гидратов в приповерхностных горизонтах осадков северо-восточного склона о. Сахалин // Геология морей и океанов: Материалы XVII Междунар. научн. конф. Т. 1. М.: ГЕОС, 2007. С. 119–121.
18. Николаева Н.А., Деркачев А.Н., Обжиров А.И. Характерные особенности проявлений газово-флюидных эманацій на северо-восточном склоне о-ва Сахалин (Охотское море) // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 3. С. 38–52.
19. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
20. Обжиров А.И., Астахов А.С., Астахова Н.В. Генезис и условия формирования аутигенных карбонатов в четвертичном осадочном чехле района Сахалино-Дерюгинской газовой аномалии (Охотское море) // Океанология. 2000. Т. 40, № 2. С. 280–288.
21. Потоки метана на границе вода-атмосфера в южной части Татарского пролива Японского моря: особенности распределения и изменчивости / Р.Б. Шакиров, М.Г. Валитов, Н.С. Сырбу и др. // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 9. С. 1215–1230. DOI 10.15372/GiG2019184
22. Результаты первых камерных измерений потоков метана на гидрометеорологической обсерватории «Тикси» / В.М. Ивахов, И.Л. Кароль, А.А. Киселев и др. // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2015. № 576. С. 27–41.
23. Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. Распределение гелия и водорода в отложениях и воде на склоне о. Сахалин // Литология и полез. ископаемые. 2016. № 1. С. 68–81.
24. Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Яцук А.В., Аксентов К.И., Карабцов А.А., Вовна В.И., Осъмушко И.С., Короченцев В.В. Икаит в зоне метановой аномалии на континентальном склоне Японского моря // Вестн. КРАУНЦ. 2020. № 2. Вып. 46. С. 72–84.
25. Шеин В.С. Геология и нефтегазоносность России // М.: ВНИГНИ. 2006. с. 620.
26. Яницкий И.Н. Гелиевая съемка. М.: Недра, 1979. 96 с.
27. Dickens G.R. Modeling the global carbon cycle with a gashydrate capacitor: significance for the latest Paleocene thermal maximum // Natural gas hydrates: occurrence, distribution, and dynamics / Eds C.K. Paull., W.P. Dillon. Amer. Geophys. Union. 2002. V. 124. P. 19–38.
28. Frank T.D., Thomas S.G., Fielding C.R. On using carbon and oxygen isotope from glendonites as paleoenvironmental proxies: a case study from the Premian system of Eastern Australia // J. Sedimentary Res. 2008. V. 78.
29. Greinert J., Derkachev A. Glendonites and methane-derived Mg-calcites in the Sea of Okhotsk, Eastern Siberia: implications of a venting-related Ikaite/glen-donite formation // Marine Geol. 2004. V. 204. P. 129–144
30. James N.P., Narbonne G.M., Dalrymple R.W., Kyser T.K. Glendonites in Neoproterozoic low-latitude, interglacial, sedimentary rocks, northwest Canada: Insights into the Cryogenian ocean and Precambrian cold-water carbonates // Geol. 2005. V. 33, N. 1, P. 9–12.
31. Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I., Gil S.G., Jukes V. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change // Geofluids. 2002. V. 2, N 2. P. 111–129.
32. Kodina L.A., Tokarev V.G., Vlasova L.N., Korobeinik G.S. Contribution of biogenic methane to ikaite formation in the Kara Sea: Evidence from the stable carbon isotope geochemistry. Siberian river run-off in the Kara Sea / Eds. R. Stein, K. Fahl, D.K. Fuetterer, E.M. Galimov. 2003 // Proc. Marine Sci. Amsterdam: Elsevier, 2003. V. 6. P. 349–374.
33. Mikhailova K., Rogov M.A., Ershova V.B., Vereshchagin O.S., Shurekova O.V., Feodorova A.A., Zakharov V. Middle Jurassic–Lower Cretaceous glendonites from the eastern Barents Shelf as a tool for paleoenvironmental and paleoclimatic reconstructions // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2021. 579, 110600. DOI:10.1016/J.PALAEO.2021.110600
34. Mishukova G.I., Yatsuk A.V., Shakirov R.B. Distribution of methane fluxes on the water–atmosphere interface in different regions of the World Ocean. Geosistemy perekhodnykh zon // Geosystems of transition zones, 2021, V. 5, N. 3. P. 240–254. (In Russ. & Engl.). DOI:10.30730/gtr.2021.5.3.240-247.247-254
35. Morales C., Rogov M.A., Wierzbowski H., Ershova V.B., Suan G., Adatte T., Föllmi K.B., Tegelaar E.W., Reichart G., Lange G.J., Middelburg J.J., Schootbrugge B.V. Glendonites track methane seepage in Mesozoic polar seas // Geology. 2017. 45. P. 503–506.
36. Nielsen P., Swennen R., Dickson J.A.D., Fallick A.E., Kepens E. Spheroidal dolomites in a Visean karst system – bacterial induced origin? // Sedimentology. 1997. V. 44. P. 177–195.
37. Operation report of Sakhalin slope gas hydrate Project 2012, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 59, Korea Polar Research Institute / Eds. Y.K. Jin, H. Shoji, A. Obzhirov, B. Baranov. Incheon, 2013, 163 p.
38. Operation report of Sakhalin slope gas hydrate Project, 2015, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 70. New energy resources Research Center, Kitami Institute of Technology / Eds. H. Minami, Y.K. Jin, B. Baranov, N.A. Nikolaeva, A. Obzhirov. Kitami. 2016. 119 p.
39. Peckmann J., Goedert J.L., Thiel V., Michaelis W., Reitner J. A comprehensive approach to the study of methane-seep deposits from the Lincoln Greek Formation, western Washington State, USA // Sedimentology. 2002. V. 49. P. 855–873.
40. Ponomareva A.L., Mishukova O.V. Methane fluxes at the water–atmosphere interface and gas-geochemical anomalies in the bottom sediments in the northwestern part of the Sea of Japan // Russian Geol. and Geophys. 62 (12), 1385–1400. DOI:10.2113/RGG20204242
41. Rogov M., Ershova V., Vereshchagin O., Vasileva K., Mikhailova K., Krylov A. Database of global glendonite and ikaite records throughout the Phanerozoic // Earth Syst. Sci.

- Data. 2021. V. 13. P. 343–356.
42. Selleck B.W., Carr P.F., Jones B.G. A review and synthesis of glendonites (pseudomorphs after ikaite) with new data: assessing applicability as recorders of ancient coldwater conditions // J. Sedimentol. Res. 2007. V. 77. P. 980–991.
43. Von Rad U., Rosch H., Berner U. et al. Authigenic carbonates derived from oxidized methane vented from the Makran accretionary prism off Pakistan // Marine Geol. 1996. 136.

Рекомендована к печати И.Б. Цой

после доработки 25.01.2023 г.

принята к печати 24.03.2023 г.

T.S. Iakimov, R.B. Shakirov, N.S. Syrbu, A.O. Kholmogorov, A.V. Sorochinckaja

Manifestations of authigenic mineralization along the continental slope of the Sea of Japan and in the Tatar Strait (materials of Cruise 61 on r/v Akademik Oparin)

During the complex scientific research expedition in the Sea of Japan aboard the research vessel Akademik Oparin (Cruise 61), carbonate nodules were recovered by gravity coring, which were subsequently identified as pseudomorphs after ikaite (glendonite). The article presents the results of electron-probe and tomography studies of authigenic carbonates and gas-geochemical characteristics of host sediments occurring along the continental slope of the Sea of Japan and in the Tatar Strait.

Key words: ikait, glendonite, nodule, methane, Sea of Japan, Tatar Strait.