

Применение литолого-геохимического подхода для определения генезиса каверновых коллекторов доломитового резервуара (нижний девон, Гыданский полуостров)

К.Ю. Васильева^{1*}, В.Б. Ершова^{1,2}, А.П. Вилесов³, Т.Г. Окунева⁴, А.Д. Рыбакова⁴, Н.Г. Солошенко⁴,
В.Ю. Прокофьев⁵, А.Е. Маслобоева¹, Д.А. Севрюков³, И.Ю. Бугрова¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Геологический институт РАН, Москва, Россия

³Группа компаний «Газпром нефть», Санкт-Петербург, Россия

⁴Институт геологии и геохимии им. ак. А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

⁵Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

На основе комплексного подхода, включающего петрографические, катодоллюминесцентные, изотопные и геохимические исследования, а также термобарометрию, установлен генезис каверн в карбонатных породах нижнего девона Западно-Таймырского потенциально нефтегазоносного района (восточное побережье Гыданского полуострова). Примененный подход показал, что известняки, накопившиеся в условиях открытой сублиторали, претерпели раннюю доломитизацию, при этом сформировались доломиты с тонко-среднекристаллической матрицей, значительно уплотненные при последующем погружении и геостатической компакции. Образование трещин происходило в позднегерцинский этап тектонического развития региона (поздний карбон – пермь); к трещинам приурочены щелевидные каверны. И трещины, и каверны частично заполнены высокотемпературными генерациями доломита, кварца и кальцита; низкие отрицательные значения $\delta^{18}\text{O}$ и высокие положительные Eu/Eu^* аномалии подтверждают их гидротермальный генезис. Близость спектров нормализованных редкоземельных элементов во вмещающей породе и трещинной (каверновой) генерации карбоната свидетельствует о том, что источником вещества при кристаллизации трещинного карбоната в том числе была вмещающая порода. Полученные результаты показывают высокий потенциал использования примененного подхода при установлении этапов развития карбонатного коллектора и для прогноза его распространения в разрезе и по площади.

Ключевые слова: диагенез, каверны, история формирования коллектора, изотопно-геохимические исследования, доломиты, нижний девон, Гыданский полуостров

Для цитирования: Васильева К.Ю., Ершова В.Б., Вилесов А.П., Окунева Т.Г., Рыбакова А.Д., Солошенко Н.Г., Прокофьев В.Ю., Маслобоева А.Е., Севрюков Д.А., Бугрова И.Ю. (2025). Применение литолого-геохимического подхода для определения генезиса каверновых коллекторов доломитового резервуара (нижний девон, Гыданский полуостров). *Георесурсы*, 27(1), с. 114–124. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.1.22>

Введение

Восстановление истории вторичных преобразований, а также определение условий и последовательности этих преобразований являются важными вопросами при изучении карбонатных коллекторов, так как постседиментационные события (во время диагенеза, катагенеза, а также гидротермальных и метасоматических преобразований)

способны в значительной степени изменять пустотное пространство карбонатных пород. В значительной степени реконструкция условий вторичных преобразований основывается на полевых наблюдениях, при этом играют значительную роль такие характеристики, как распределение вторичных изменений снизу вверх по разрезу и по латерали, приуроченность к трещинам и разломам, горизонтам стратиграфических несогласий и интрузивным телам. При работе с керном глубоких скважин многие площадные характеристики вторичных процессов оказываются недоступными или ограничено доступными, и в значительной степени приходится опираться на литологические характеристики пород, представленные в ограниченном керновом материале. Тем не менее,

* Ответственный автор: Ксения Юрьевна Васильева
e-mail: k.vasilyeva@spbu.ru

© 2025 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

как показано, в частности, в (Machel, 2004), одинаковые по составу и облику карбонатные минералы могут кристаллизоваться в различных обстановках, при этом образуя различные формы тел. Например, доломит может кристаллизоваться как на этапе раннего (морского диагенеза), так и в процессе погружения на любых глубинах, и при гидротермальной проработке известнякового разреза (Machel, 2004). При этом, форма доломитовых тел будет в значительной степени предопределяться в первом случае седиментационной средой и морфологией крупных карбонатных осадочных тел (рифов, карбонатных платформ), во втором – характеристик флюида и его источником, а в третьем – близостью к разломам и трещинам.

Привлечение дополнительных прецизионных аналитических методов может играть важную роль при реконструкции условий вторичных преобразований карбонатных коллекторов. В научной литературе при проведении исследований карбонатных пород выработалось несколько подходов: детальный анализ седиментологии разреза, изучение шлифов, данные изотопно-геохимических и термобарометрических исследований. Такой комплексный подход успешно применяется рядом авторов для изучения как традиционных карбонатных коллекторов (например, Fu et al., 2006; Bai et al., 2020), так и низкопроницаемых пород (Yurchenko et al., 2021). К настоящему времени подходы к интерпретации подобных исследований уже многократно апробированы (например, Zheng et al., 2019; Koeshidayatullah et al., 2020; Breislin et al., 2022; Liang et al., 2022), что делает возможным уверенную интерпретацию собственных данных при сравнении с имеющимися моделями.

Объектом настоящего исследования являются доломиты эмского яруса (нижний девон), вскрытые одной из скважин в пределах восточного побережья Гыданского полуострова (рис. 1). Интерес к данному региону определяется его доказанным нефте- и газоносным потенциалом (Букатова и др., 2022; Зинченко и др., 2022), преимущественно сосредоточенным в породах мощного палеозойского карбонатного комплекса. Доломиты эмского возраста отобраны на глубине более 2500 м. Они неравномерно кавернозные и трещиноватые (рис. 2) и характеризуются сложной структурой пустотного пространства. Для каверн существует две главные модели образования: 1) частичное растворение пород в условиях поверхностного и приповерхностного карста; 2) проработка пород гидротермальными растворами. Первый тип каверн связан с поверхностями перерыва (Ahr, 2008; Moog, Wade, 2013; Dan et al., 2018; Zhou et al., 2022), в то время как второй тип каверн локализуется вблизи тектонических нарушений (Davies, Smith, 2006; Dristas et al., 2017; Вилесов, Чертина, 2020), поэтому восстановление процессов, влияющих на образование каверн, может нести важную информацию при построении геологической модели кавернозного карбонатного резервуара и прогнозе латерального распространения коллектора. Целью данной работы являлась реконструкция истории вторичных преобразований и формирования трещинно-кавернового карбонатного коллектора с использованием комплексного подхода на примере эмских отложений нижнего девона одной из скважин, пробуренных в пределах Гыданского полуострова.

Геологическое строение изучаемой территории

Регион исследований располагается в северо-западной части Красноярского края, на левом берегу Енисейского залива (рис. 1). Тектонически регион расположен в зоне сочленения Западно-Сибирского мегабассейна, складчатой системы Таймыра и Енисей-Хатангского прогиба. Залегание изучаемого палеозойского комплекса осложнено рядом разрывных нарушений позднепалеозойского и поздне триасового возраста, а также интрузивными образованиями раннетриасового траппового магматизма (Перетолчин и др., 2022).

В строении разреза палеозойского комплекса региона участвуют породы ордовикского, силурийского, девонского и каменноугольного возраста преимущественно карбонатного состава; породы в разной степени трещиноватые (Вилесов и др., 2022). В настоящее время разрез палеозоя вскрыт бурением до среднего ордовика (Букатова и др., 2022). Вышележащие мезозойские отложения по составу вулканогенные, вулканогенно-осадочные и глинисто-терригенные. Эмский ярус нижнего девона вскрыт в интервале глубин ~ 2700–2800 м. В этом интервале в первой поисковой скважине выполнен один отбор керна (9 м) с целью характеристики вещественного состава разреза и получения информации о нефтематеринских породах и породах-коллекторах. Породы в интервале отбора представлены вторичными темно-серыми тонко-, среднекристаллическими доломитами, с системой тектонических трещин и крупных каверн, связанных трещинами. В породах сохранились остатки морской фауны – строматопороидей и кораллов. Седиментация происходила в пределах открытой сублиторали со слабой придонной гидродинамикой (Вилесов и др., 2022) и накоплением карбонатного ила.

Материалы и методы исследований

Материалом для работы послужили описания и фотографии керна кавернозных доломитов (~10 м), а также 18 образцов, отобранных из данного разреза на разные виды аналитических исследований. В рамках настоящей работы были использованы результаты петрографических, катодоллюминесцентных, изотопно-геохимических и термобарометрических исследований. Описание структур и текстур вторичных доломитов приведено согласно классификациям Сибли и Грегга (Sibley, Gregg, 1987) и Фолка (Folk, 1962). Для анализа последовательности постседиментационных изменений использовался стадийный анализ (Япаскерт, 1995; Flugel, 2004). Описания типов пустот приведено в соответствии с классификацией (Choquette, Pray, 1970). Для реконструкции процессов формирования каверн и их частичного заполнения из образцов микродрилом были выделены пробы на изотопные и геохимические исследования из вмещающих пород и доломитов, инкрустирующих стенки каверн и трещин. Изотопные исследования (10 проб из вмещающих пород и 8 проб из каверновых и трещинных доломитов) проводились на изотопном масс-спектрометре Delta V Plus (Thermo Fisher Scientific, Германия) в лаборатории изотопного и элементного анализа Казанского федерального университета. Геохимические исследования проводились

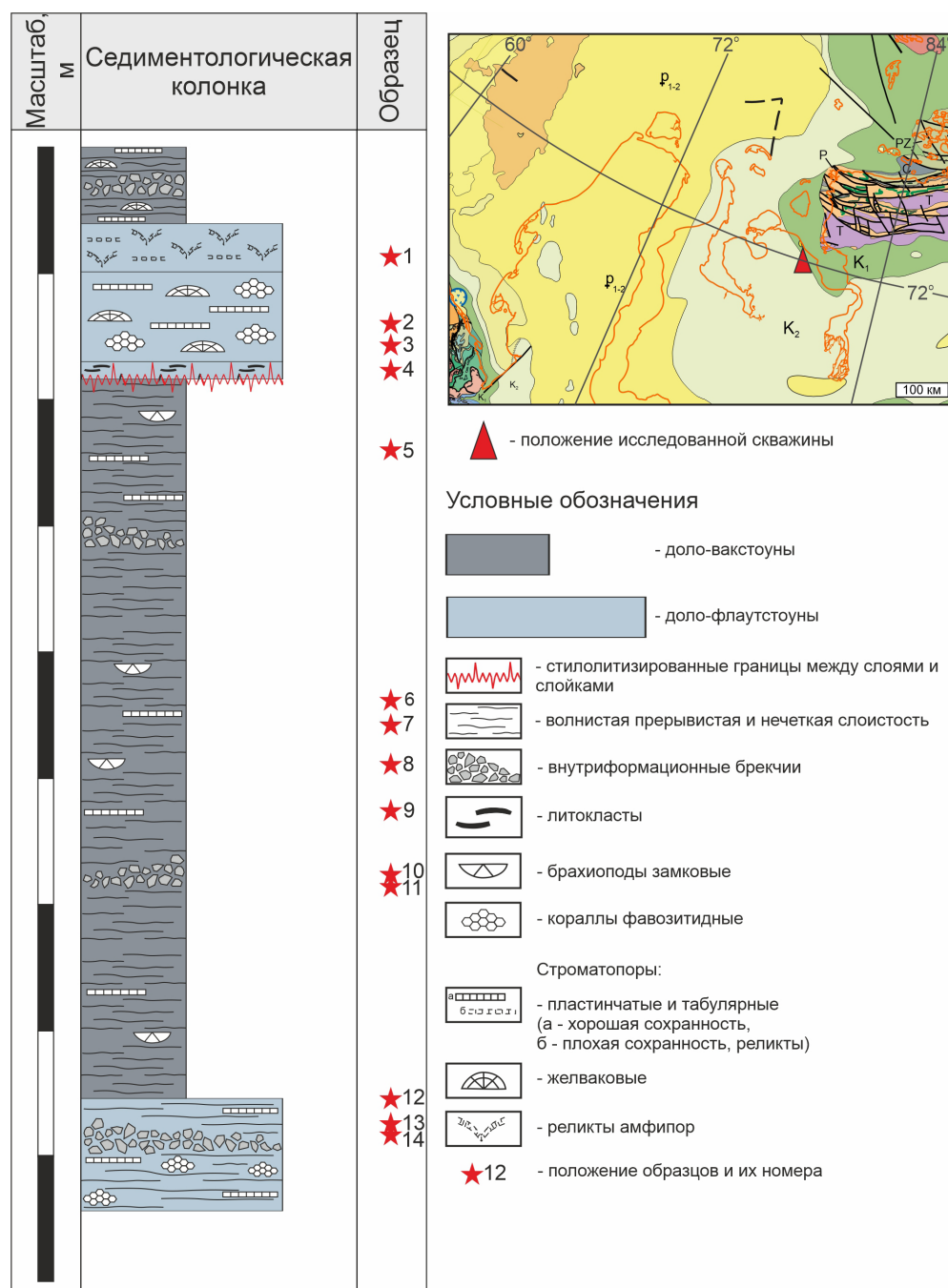


Рис. 1. Седиментологическая колонка эмских отложений нижнего девона изучаемой скважины (слева, составлена авторами) с указанием положения изученных образцов, а также местоположение скважины на геологической карте (справа)

после растворения в HCl и HNO_3 и выделения нерастворимого остатка для исключения его влияния на результаты анализов. Геохимические анализы (5 проб из вмещающих доломитов и 5 проб из трещин) были выполнены на спектрометрах Perkin Elmer ICP-AES Optima 8000 DV и NexION 300S (Perkin Elmer) в Институте геологии и геохимии им. ак. А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН (ИГГ УрО РАН). Исследования геохимического состава горных породы с применением методов масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН №12301180012-9 с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик». Термобарометрические исследования

для флюидных включений (3 образца) выполнялись в лаборатории геохимии ИГЕМ РАН при помощи измерительного комплекса, созданного на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы «Linkam» (Англия), микроскопа «Olympus BX51», видеокамеры и управляющего компьютера.

Результаты исследований

Петрографическая и катодолюминесцентная характеристика изучаемых пород. Последовательность постседиментационных изменений

Породы изученного интервала представлены серыми неравномерно трещиноватыми и кавернозными доломитами (рис. 2), сложенными идиоморфными субгидральными кристаллами доломита размером 0,05–0,1 мм, темными

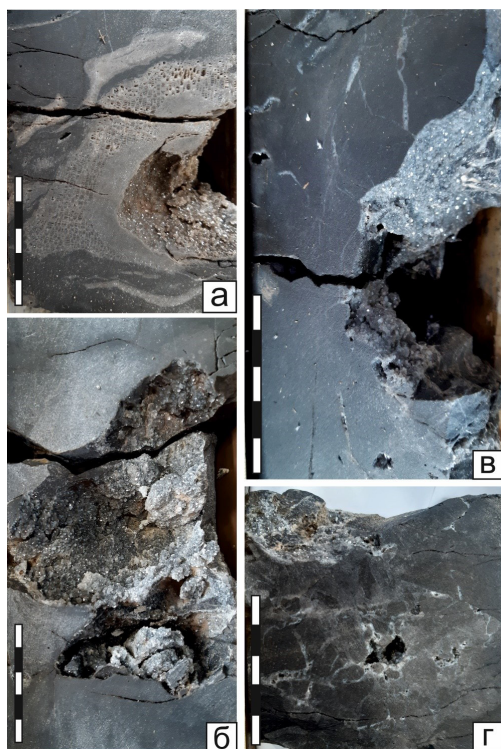


Рис. 2. Фотографии кавернозных и трещиноватых доломитов эмского яруса (вертикальные спицы керна): а – крупная каверна по частично растворенной массивной колонии табулятного коралла; б – крупная полость растворения с инкрустациями по стенкам кристаллами доломита и кальцита; в – трещиновато-кавернозный доломит с невыдержанными по ширине трещинами; г – брекчированный трещиновато-кавернозный доломит. Длина масштабной линейки – 5 см.

в проходящем свете, образующими плотную мозаичную практически непористую структуру. В породах встречаются реликты скелетов кораллов и строматопороидей, замещенные доломитом с более крупными (до 0,15 мм) прозрачными кристаллами, с зональным темно-красным КЛ-свечением. В изученных карбонатах встречаются тонкие разнонаправленные трещины, заполненные доломитом, а также разнообразные по форме каверны, переходящие в полости (до 10 см в диаметре), развитые как по остаткам фауны, так и в результате растворения матрикса вдоль трещин. Трещины и каверны могут быть частично заполнены крупными цементными идиоморфными кристаллами доломита (размер кристаллов до 1 мм), реже – аутигенными кварцевыми зернами размером до 0,3 мм, без катодолюминесценции. Доломит, инкрустирующий стенки каверн, в проходящем свете прозрачный, иногда зональный, обладает зональной катодолюминесценцией в разных оттенках красного цвета. В единичных случаях остальное пространство может быть заполнено кальцитом с тусклым коричневатым катодолюминесцентным свечением (рис. 3). Редко в доломитах появляются стилолитовые швы, выполненные органическим веществом.

Таким образом, по результатам петрографических и катодолюминесцентных исследований, выделен ряд постседиментационных изменений и восстановлена их последовательность (рис. 3, 4). Наиболее ранним процессом являлась доломитизация матрикса (образование доломита генерации D1); следующим процессом, следы

которого отмечаются, было раскрытие трещин. Каверны тяготеют к трещинам, поэтому мы предполагаем, что выщелачивание породы и образование каверн происходило после трещинообразования. После того как и каверны, и трещины были сформированы, началось их заполнение второй генерацией доломита (D2), а затем – кварцем (Qz) и кальцитом (Cal). Силолитовые швы, в свою очередь, секут кристаллы доломита в кавернах и трещинах, и на границе со стилолитовыми швами кристаллы доломита частично растворяются, то есть стилолитовые швы могли образоваться после доломита генерации D2. Взаимоотношения образования стилолитовых швов с другими процессами не устанавливаются. Обобщенная последовательность постседиментационных процессов показана на рис. 4.

Результаты геохимических исследований

Для исследований геохимических характеристик было отобрано 10 проб – 5 проб из вмещающих доломитов (максимально далеко от каверн) и 5 из кристаллов доломита с поверхности стенок каверн. Результаты геохимических исследований (табл. 1) показывают, что доломиты характеризуются нестехиометричным составом с преобладанием кальция в составе доломита (отношение Ca/Mg – от 1,74 до 1,95, в стехиометричном доломите это соотношение составляет 1,67); содержания железа повышены в каверновых доломитах (0,08–0,27% Fe) относительно вмещающих (0,05–0,07 % Fe).

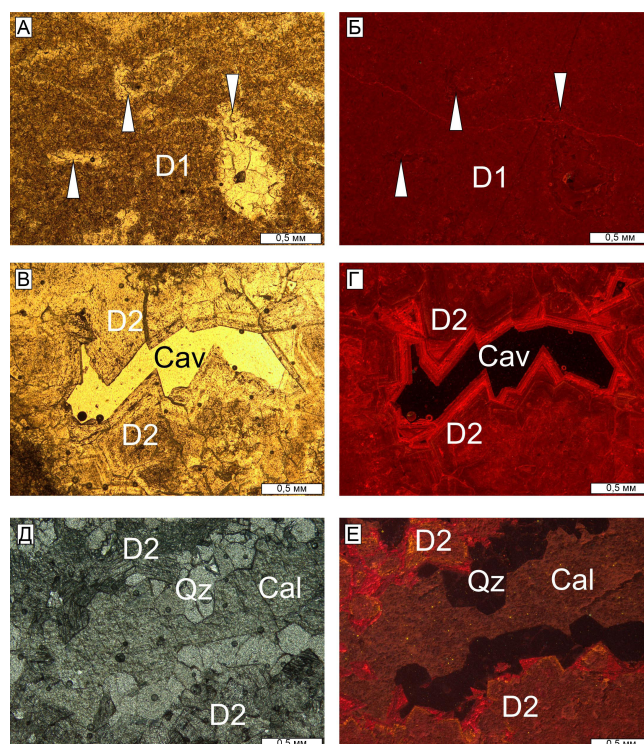


Рис. 3. Петрографические и катодолюминесцентные характеристики исследованных доломитов, слева фотографии в проходящем свете, справа – те же участки, при катодолюминесцентном свечении. Индексами на фотографиях показаны: D1 – ранний доломит, замещающий матрикс, D2 – каверновый доломит, Qz – аутигенный кварц в кавернах, Cal – кальцит в кавернах, Cav – незаполненная каверна, белыми стрелками показаны реликты биокластов.

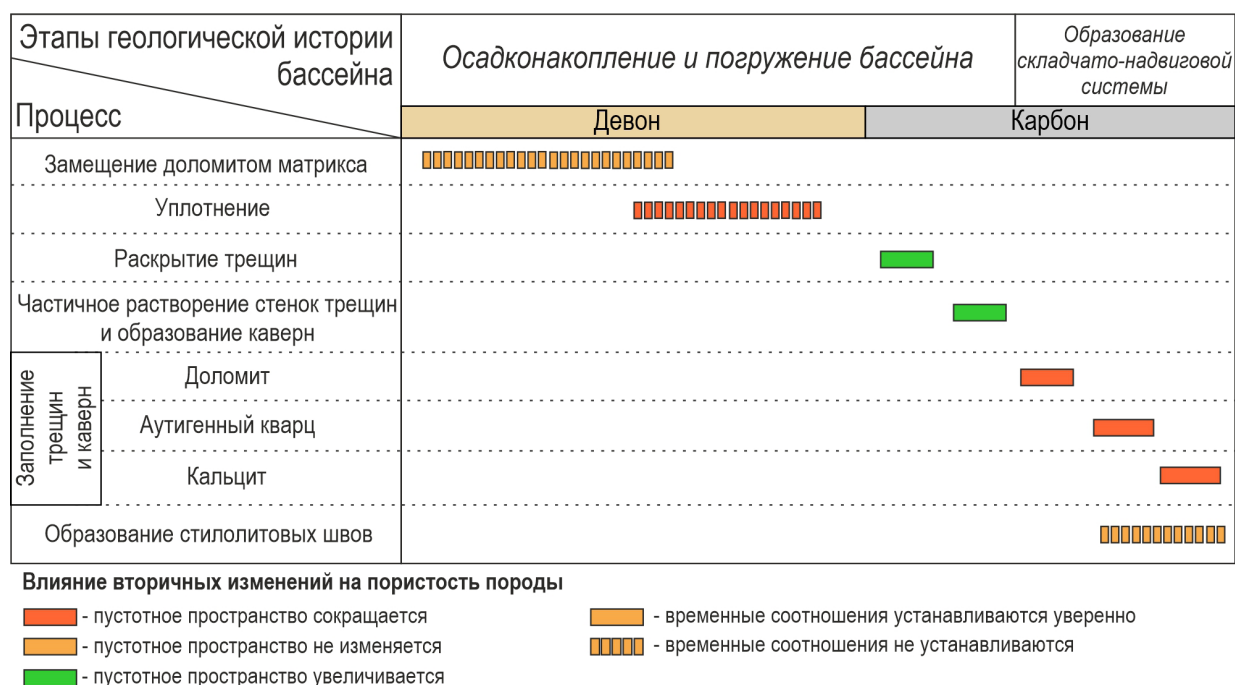


Рис. 4. Последовательность постседиментационных изменений в изученных породах эмского возраста

	Номера образцов*									
	6вм	6кав	7вм	7кав	8вм	8кав	9вм	9кав	10вм	10кав
Ca, %	14,76	15,90	13,49	14,71	12,86	12,93	14,80	12,29	13,29	15,30
Mg, %	7,85	8,70	7,42	7,56	7,38	6,66	7,79	6,46	7,12	8,00
Fe, %	0,05	0,008	0,05	0,008	0,07	0,11	0,05	0,12	0,05	0,27
Mn, ppm	40	50	30	60	40	60	40	50	40	50
Sr, ppm	60	60	40	60	70	50	70	60	50	70
La, ppm	0,4	0,37	0,18	0,35	0,28	0,31	0,36	0,37	0,4	0,6
Ce, ppm	0,53	0,47	0,24	0,45	0,34	0,37	0,53	0,42	0,7	0,9
Pr, ppm	0,06	0,054	0,031	0,048	0,042	0,041	0,06	0,041	0,09	0,1
Nd, ppm	0,26	0,21	0,12	0,19	0,17	0,16	0,25	0,15	0,35	0,4
Sm, ppm	0,049	0,043	0,025	0,041	0,035	0,029	0,05	0,027	0,08	0,08
Eu, ppm	0,17	0,4	0,08	0,6	0,27	0,28	0,024	0,34	0,029	0,41
Gd, ppm	0,082	0,064	0,042	0,062	0,057	0,051	0,079	0,046	0,11	0,12
Tb, ppm	0,01	0,007	0,005	0,006	0,007	0,006	0,01	0,005	0,015	0,014
Dy, ppm	0,06	0,042	0,034	0,034	0,046	0,031	0,06	0,027	0,09	0,08
Y, ppm	0,9	0,5	0,5	0,4	0,7	0,4	0,6	0,3	0,8	0,7
Ho, ppm	0,015	0,009	0,008	0,008	0,011	0,007	0,013	0,006	0,02	0,016
Er, ppm	0,044	0,025	0,025	0,022	0,032	0,02	0,036	0,016	0,056	0,047
Tm, ppm	0,006	0,003	0,0032	0,0031	0,004	0,0026	0,005	0,0024	0,008	0,007
Yb, ppm	0,04	0,02	0,021	0,019	0,03	0,015	0,03	0,016	0,05	0,04
Lu, ppm	0,006	0,003	0,003	0,0028	0,004	0,0026	0,005	0,0025	0,008	0,007
Y/Ho	60	56	63	50	64	57	46	50	40	44
Ce/Ce*	0,77	0,75	0,73	0,77	0,71	0,73	0,82	0,74	0,85	0,84
Eu/Eu*	14	44	14	73	33	40	2	56	2	23

Табл. 1. Концентрации главных, малых и рассеянных элементов в пробах изученных доломитов. * Номера образцов соответствуют представленным на колонке на рис. 1; если после номера образца стоит «вм» – пробу отбирали из вмещающего доломита, если стоит «кав» – пробу отбирали из доломита, инкрустирующего края каверн.

Каверновые доломиты характеризуются более высокими Eu/Eu^* аномалиями (23–73) и более низкими Y/Ho отношениями (44–57) по сравнению с вмещающими доломитами (во вмещающих доломитах Eu/Eu^* аномалия варьирует от 2 до 33, Y/Ho отношение варьирует от 40 до 64). Две пробы из вмещающих пород характеризуются относительно низкими Eu/Eu^* аномалиями (≈ 2), возможно, эти пробы в наименьшей степени претерпели гидротермальное воздействие и отражают геохимические характеристики доломитов, образовавшихся на наиболее раннем этапе преобразований. Остальные три пробы вмещающих доломитов характеризуются более высокими Eu/Eu^* аномалиями, что, скорее всего, связано с их проработкой гидротермальными флюидами (Michard, Albarede, 1986; Alexander et al., 2008; Mongelli et al., 2018). Таким образом, можно считать, что источником доломита выполнения каверн являются гидротермальные растворы, в то время как в формирование геохимических характеристик вмещающих пород значительный вклад внесли как гидротермальные флюиды, так и флюиды другой природы (см. раздел «Результаты изотопных исследований»).

На рис. 5 хорошо видно, что несмотря на отличающуюся величину аномалий и соотношений ряда редкоземельных элементов, общая форма спектров нормализованных концентраций редкоземельных элементов похожа: спектры имеют почти прямую форму с положительными

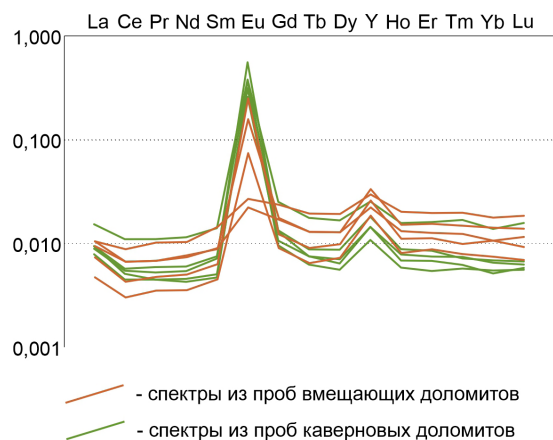


Рис. 5. Спектры РЭАС-нормализованных концентраций для проб доломитов из исследованного интервала

Eu/Eu^* и Y аномалиями. Схожесть спектров позволяет предполагать, что гидротермальные растворы, проходя по трещинам, частично растворяли стенки вмещающей породы, а затем при пересыщении или на геохимических барьерах из раствора выпадали карбонатные минералы – доломит и кальцит, которые в некоторой степени унаследовали геохимические характеристики вмещающих пород.

Результаты изотопных исследований

Для изотопных исследований было сделано 8 проб из вмещающих доломитов (генерация D1) и 10 проб из цементных доломитов (генерация D2), инкрустирующих стенки каверн и трещин. Результаты приведенных исследований (рис. 6) показывают, что по изотопным характеристикам вмещающие породы близки к составу карбонатных минералов, кристаллизующихся из морской воды ($\delta^{18}\text{O}$ варьирует от $-4,2$ до $+0,36$ ‰ V-PDB, значения $\delta^{13}\text{C}$ характерны для растворенного неорганического углерода морской воды – от $-2,86$ до $-1,03$ ‰ V-PDB). Эти точки образуют отдельное поле на диаграмме изотопного состава, это поле почти не пересекается с полем доломитов, отобранных из стенок каверн и трещин. В доломитах инкрустирующие стенки трещин и каверн $\delta^{18}\text{O}$ ниже и составляет от $-11,9$ до $-4,19$ ‰ V-PDB (попадая в область гидротермальных карбонатных минералов), соотношения $\delta^{13}\text{C}$ близки к вмещающим доломитам и составляют от $-3,5$ до $-1,73$ ‰ V-PDB.

Результаты термобарометрических исследований

Термобарометрические исследования были проведены для кавернового доломита (табл. 2, рис. 7) и кальцита. Установлено, что каверновый доломит кристаллизовался из растворов с соленостью 3,3 до мас.-%-экв. CaCl_2 , в составе которых преобладали ионы Na , Mg и Ca (об этом говорят низкие температуры эвтектики -40 °C), при этом температура гомогенизации (минимальная температура захвата включения) составляет 182 °C. Кальцит кристаллизовался из NaCl растворов при минимальных температурах 127 °C и соленостью 3,9 мас.-%-экв. NaCl . Таким образом, термобарометрические исследования в значительной степени подтверждают выводы геохимических и изотопных исследований о высокотемпературной

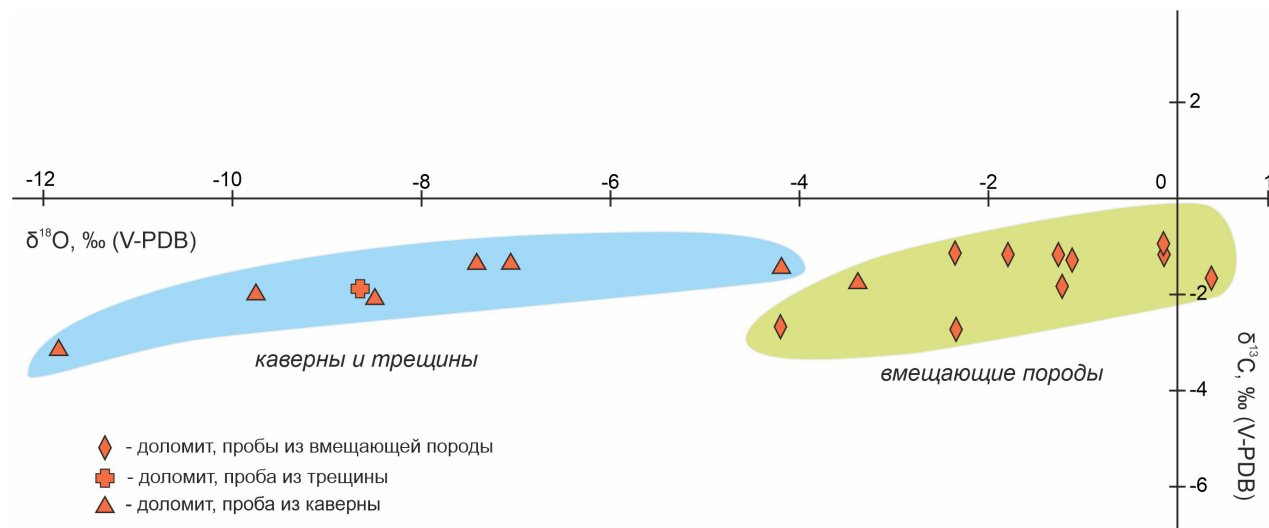


Рис. 6. Соотношения стабильных изотопов кислорода и углерода для доломитов исследованного интервала

Образец	Генерация минерала	Тип включений*	Количество включений	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}, ^\circ\text{C}$	$C_{\text{солей}}, \text{мас. \% экв. CaCl}_2$	$d, \text{г/см}^3$
1	доломит D1	1 П	3	129	-27	-2,0	3,3	0,96
7	кальцит Cal	1 П-В	4	182	-40	-2,4	3,9	0,92

Табл. 2. Результаты термобарометрических исследований минералов, заполняющих трещины и каверны в изученных образцах. * Тип включений: П – первичные, П-В – первично-вторичные; $T_{\text{гом}}$ – температура гомогенизации, $T_{\text{эвт}}$ – температура эвтектики, $T_{\text{пл}}$ – температура плавления последнего кристалла льда, $C_{\text{солей}}$ – рассчитанная массовая доля солей, d – плотность флюида.

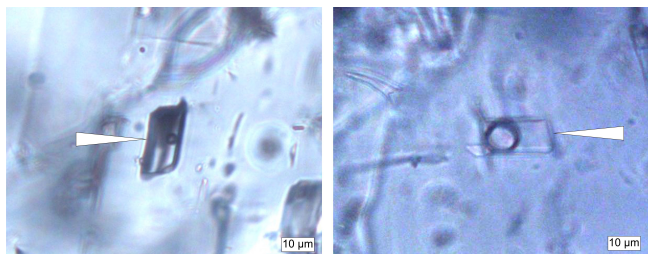


Рис. 7. Фотографии двухфазных водно-солевых включений (показаны белыми стрелками) при комнатной температуре в каверновом доломите из исследованного интервала

гидротермальной природе флюидов, которые приводили к растворению стенок каверн и переотложению карбонатных минералов.

Обобщение результатов и реконструкция истории постседиментационных изменений

Исходные известняки, сохранившиеся с момента осадконакопления, в интервале отбора керна не представлены. В изученных доломитах встречены редкие реликты биокластов (структура близка к мад- и вакстоунам по классификации Данхэма (Dunham, 1962) и отдельных скелетов (флаустоуны) (Вилесов и др., 2022). По всей видимости, во время осадконакопления до литификации осадки представляли собой мад-вакстоуны, реже флаустоуны, сложенные кальцитом, либо арагонитом, при этом в микривоматрикс присутствовали межкристаллические поры, в которых сохранялась морская вода, захваченная во время осадконакопления. При погружении и постепенной литификации происходил ионный обмен вмещающей породы и поровых вод, что приводило к доломитизации пород. Изотопно-геохимические характеристики ($\delta^{18}\text{O}$, Y/No отношение, отсутствие Eu/Eu* аномалии) образованных доломитов показывают, что они, скорее всего, не были связаны с гидротермальными процессами и частично сохранили метки морской воды. Доломит, заместивший матрикс породы, обладает идиоморфными субгедральными кристаллами и плотной мозаичной структурой, то есть ранняя доломитизация не увеличила пористость породы; возможно, дополнительно породы были уплотнены при дальнейшем погружении пород.

В позднем карбоне – ранней перми при позднегерцинской тектонической активизации (Перетолчин и др., 2022) в породах сформировалась система трещин, которые служили проводящими каналами для гидротермальных минерализованных растворов. Гидротермальная природа каверн подтверждается как изотопными метками каверновых доломитов (цементные доломиты образуют отдельное поле с довольно низкими значениями $\delta^{18}\text{O}$

от $-11,9$ до $-4,19$ ‰ V-PDB, рис. 6), так и их геохимическими характеристиками – высокими Eu/Eu* аномалиями и высокими температурами гомогенизации газовой-жидких включений (182°C). Минерализация растворов, из которых кристаллизовался каверновый доломит, близка к морской (39 ‰ судя по данным термобарометрии). Кальцит, кристаллизовавшийся после доломита, характеризуется более низкими температурами гомогенизации (127°C), и, возможно, его кристаллизация происходила при остывании гидротермальных флюидов и удалении из растворов двухвалентных ионов Mg.

Основными путями миграции растворов являлись трещины, однако вмещающие породы при взаимодействии с гидротермами частично растворялись (с образованием каверн); растворенные карбонаты быстро переотлагались в пределах того же стратиграфического уровня на стенках каверн и трещин, однако в результате температурного фракционирования трещинные генерации кальцита и доломита характеризуются более низкими (по сравнению с вмещающими породами) значениями $\delta^{18}\text{O}$ и более высокими Eu/Eu* аномалиями. Предполагаемая модель развития коллектора в изученных породах эмского яруса показана на рис. 8.

Заключение

По данным, полученным в ходе исследования, нами была построена модель изменения структуры пустотного пространства карбонатных пород нижнего девона на примере первой поисковой скважины в восточной части Гыданского полуострова, и показано, как процессы постседиментационных преобразований карбонатных пород эмского возраста определялись этапами геологического развития бассейна. Основными этапами развития пород-коллекторов данного стратиграфического уровня являются следующие.

1. На наиболее раннем этапе произошла доломитизация первичных осадков морскими водами; геохимические характеристики ($\delta^{18}\text{O}$, соотношения Y/No) вмещающих тонко-, среднекристаллических доломитов близки к характеристикам карбонатных пород, сформировавшихся из морской воды. В результате ранней доломитизации и при последующем уплотнении погружения образовывались плотные, практически непористые, породы.

2. В позднем карбоне – ранней перми породы претерпели растрескивание, и по трещинам мигрировали гидротермальные флюиды; эти флюиды частично растворяли стенки трещин, что приводило к образованию каверн, а затем эти флюиды были источником вещества для кристаллизации доломита, который частично заполнял трещины и каверны. Гидротермальная природа растворов, из которых происходила кристаллизация кавернового

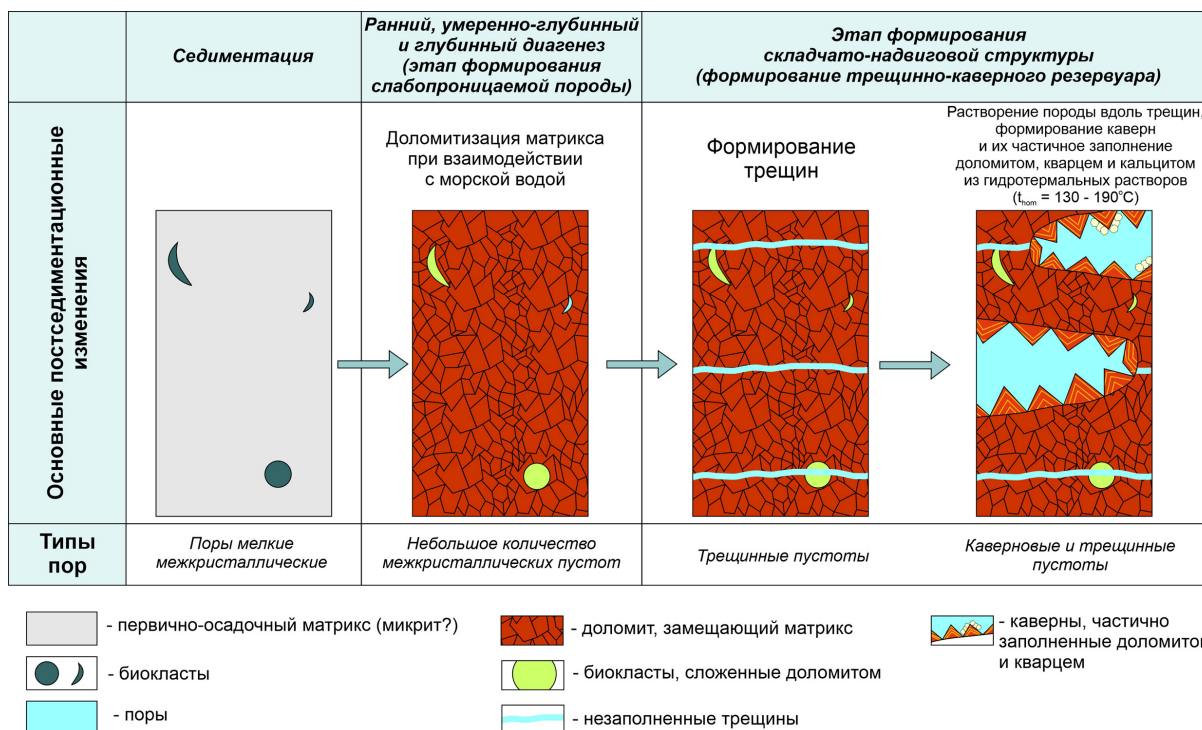


Рис. 8. Модель постседиментационных преобразований и изменения порового пространства для кавернозных доломитов исследованного интервала

доломита, хорошо подтверждается высокими минимальными температурами захвата двухфазных водно-солевых включений (182°C), низкими отрицательными значениями $\delta^{18}\text{O}$ и высокими положительными Eu/Eu^* аномалиями.

Таким образом, развитие коллекторских свойств изученного интервала доломитов эмского возраста в значительной степени было связано с формированием системы тектонических нарушений и гидротермальных преобразований толщи. Распространение коллекторов такого типа ограничено зонами разрывных нарушений. Результаты проведенных комплексных исследований можно использовать при прогнозе латерального распространения коллекторов в изучаемом потенциально перспективном нефтегазоносном регионе.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам за замечания и предложения, которые позволили значительно улучшить работу.

Литература

- Букатова Е.М., Ужегова Ю.А., Погребнюк С.А., Федоров С.А., Вилесов А.П., Перетолчин К.А., Морозов Н.В., Грановский А.М. (2022). Перспективы нефтегазоносности ордовикско-каменноугольных отложений слабоизученной зоны Западного Таймыра в условиях ограниченных данных. *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*, 7(4), с. 28–39.
- Вилесов А.П., Чертина К.Н. (2020). Палеокарст, гидротермокарст и карстовые коллекторы франских рифов Рыбинской группы. *Георесурсы*, 22(2), с. 15–28.
- Вилесов А.П., Ершова В.Б., Соловьева А.Д. (2022). Литологическая и седиментологическая характеристика разреза палеозойского комплекса Западно-Таймырского потенциально нефтегазоносного района (по данным бурения). *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*, 7(4), с. 14–27.
- Зинченко И.А., Морозов Н.В., Перетолчин К.А., Куркин А.А., Погребнюк С.А. (2022) История развития углеводородных систем Западно-Таймырского потенциально нефтегазоносного

района по результатам бассейнового моделирования. *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*, 7(4), с. 124–133.

Перетолчин К.А., Ершова В.Б., Худолей А.К., Нилов С.П. (2022). Тектоническая история зоны сочленения Таймырского складчато-надвигового пояса и структур Гыданского полуострова. *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*, 7(4), с. 83–93.

Япаскурт О.В. (1994). Стадиальный анализ литогенеза. Москва: Издательство МГУ, 142 с.

Ahr W.M. (2008). *Geology of Carbonate Reservoirs*. New York: John Wiley and Sons, 277 p. <https://doi.org/10.1002/9780470370650>

Alexander B.W., Bau M., Andersson P., Dulski P. (2008). Continently-derived solutes in shallow Archean seawater: Rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa. *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, 72, pp. 378–394. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.10.028>

Bai H., Huang W., Ma B., Wang W. (2020). Mesogenetic diagenesis of the Ordovician limestone in Yubei area, Tarim Basin, NW China. *Carbonates Evaporites* 35, 77. <https://doi.org/10.1007/s13146-020-00610-8>

Breislin C.J., Banks V.J., Crowley S.F., Marshall J.D., Millar I., Riding J.B., Hollis C.E. (2022). Mechanisms controlling the localisation of fault-controlled hydrothermal dolomitisation, Derbyshire Platform, UK. *The Depositional Record*, 9(3), pp. 734–758. <https://doi.org/10.1002/dep2.214>

Choquette P.W., Pray, L.C. (1970). Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54, pp. 207–250. <https://doi.org/10.1306/5D25C98B-16C1-11D7-8645000102C1865D>

Dan Y., Lin L., Liang B., Zhang Q., Yu Y., Cao J., Li J. (2018). Eogenetic Karst Control of Carbonate Reservoirs during a Transient Exposure: A Case Study of the Ordovician Yingshan Formation in the Northern Slope of the Tazhong Uplift, Tarim Basin, China. *Minerals*, 8(8), 342. <https://doi.org/10.3390/min8080345>

Dunham R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *AAPG*, 1, pp. 108–121. <https://doi.org/10.1306/M1357>

Davies G.R., Smith L.B. (2006). Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90, pp. 1641–1690. <https://doi.org/10.1306/05220605164>

Dristas J.A., Martínez J.C., van den Kerkhof A.M., Massonne H.J., Theye T., Frisicale M.C., Gregori D.A. (2017). Hydrothermal karst and associated breccias in Neoproterozoic limestone from the Barker-Villa Cacique area (Tandilia belt), Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 76(7), pp. 182–197. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.03.002>

Flügel E. (2010). *Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application*. Second Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 984 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2>

Folk R.L. (1965). Some aspects of recrystallization in ancient limestones. L. C. Pray, and R. S. Murray, eds. *Dolomitization and Limestone Diagenesis*: Tulsa, OK, SEPM Special Publication, 13, pp. 14–48.

Fu Q., Qing H., Bergman K. M. (2006). Dolomitization of the Middle Devonian Winnipegosis carbonates in south-central Saskatchewan, Canada. *Sedimentology*, 53(4), pp. 825–848. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00794.x>

Koeshidayatullah A., Corlett H., Stacey J., Swart P., Boyce A., Robertson H., Whitaker F., Hollis C. (2020). Evaluating new fault-controlled hydrothermal dolomitization models: Insights from the Cambrian Dolomite, Western Canadian Sedimentary Basin. *Sedimentology*, 67(6), pp. 2945–2973. <https://doi.org/10.1111/sed.12729>

Liang J., Liu S., Li L., Dai J., Li X., Mou C. (2022). Geochemical Constraints on the Hydrothermal Dolomitization of the Middle-Upper Cambrian Xixiangchi Formation in the Sichuan Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.927066>

Machel H.G. (2004). Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal. *Geological Society*, 235, pp. 7–63. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.235.01.02>

Michard A., Albarède F. (1986). The REE content of some hydrothermal fluids. *Chem. Geol.*, 55, pp. 51–60. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90127-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90127-0)

Mongelli G., Sinisi R., Paternoster M., Perri F. (2018). REEs and U distribution in P-rich nodules from Gelasian Apulian Tethyan carbonate: A genetic record. *J. Geochem. Explor.*, 194, pp. 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.07.010>

Moore C.H., Wade W.J. (2013). *Carbonate reservoirs porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework*. Amsterdam, Netherlands; Oxford, England: Elsevier, 389 p.

Sibley D.F., Gregg J.M. (1987). Classification of dolomite rock textures. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57, pp. 967–975. <https://doi.org/10.1306/212F8CBA-2B24-11D7-8648000102C1865D>

Yurchenko A., Voropaev A., Kozlova E., Morozov N., Spasennykh M. (2021). Application of the Data on $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of Carbonates for the Study of Unconventional Reservoirs on the Example of the Bazhenov Source Rocks, Western Siberia, Russia. *Geoscience*, 11(7), pp. 264–280. <https://doi.org/10.3390/geosciences11070264>

Zheng H., Ma Y., Chi G., Qing H., Liu B., Zhang X., Shen Y., Liu J., Wang Y. (2019). Stratigraphic and Structural Control on Hydrothermal Dolomitization in the Middle Permian Carbonates, Southwestern Sichuan Basin (China). *Minerals*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/min9010032>

Zhou Z., Wang X., Tang X., Wang W., Zhou H., Yang Y., Wen L., Huo F., Pei S. (2023). Karst paleotopography on top of the Dengying Formation and petroleum geological significance in the Central Sichuan Basin, China. *Energy Exploration & Exploitation*, 41(2), pp. 451–480. <https://doi.org/10.1177/01445987221143580>

Сведения об авторах

Ксения Юрьевна Васильева – кандидат геол.-минерал. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет

Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9

e-mail: k.vasilyeva@spbu.ru

Виктория Бэртовна Ершова – кандидат геол.-минерал. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет

Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9

e-mail: v.ershova@spbu.ru

Александр Петрович Вилесов – кандидат геол.-минерал. наук, ведущий эксперт, Группа компаний «Газпром нефть»

Россия, 190000, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, д. 75–79, литер Д

e-mail: Vilesov.AP@gazpromneft-ntc.ru

Татьяна Геннадьевна Окунева – младший научный сотрудник, Лаборатория физических и химических методов исследования, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН

Россия, 620010, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

e-mail: okunevatatjana@mail.ru

Анна Дмитриевна Рыбакова – инженер-исследователь, Лаборатория физических и химических методов исследования, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН

Россия, 620010, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

Наталья Геннадьевна Солошенко – научный сотрудник, Лаборатория физических и химических методов исследования, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН

Россия, 620010, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

e-mail: soloshenko@igg.uran.ru

Всеволод Юрьевич Прокофьев – доктор геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, Лаборатория геохимии, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35

e-mail: vpr@igem.ru

Анна Евгеньевна Маслобоева – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский государственный университет

Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9

e-mail: masloboeva0713@gmail.com

Денис Александрович Севрюков – заместитель руководителя программы проектов по геологии и разработке, Группа компаний «Газпром нефть»

Россия, 191167, Санкт-Петербург, Синопская набережная, д. 22

e-mail: Sevryukov.DA@tmn.gazprom-neft.ru

Ирина Юрьевна Бугрова – кандидат геол.-минерал. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет

Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9

e-mail: i.bugrova@spbu.ru

Статья поступила в редакцию 08.10.2024;

Принята к публикации 03.03.2025; Опубликовано 30.03.2025

Application of Lithological and Geochemical Approach to Determine the Genesis of Dolomite Cavernous Reservoir (Lower Devonian, Gydan Peninsula)

K.Yu. Vasileva^{1*}, V.B. Ershova^{1,2}, A.P. Vilesov³, T.G. Okuneva⁴, A.D. Rybakova⁴, N.G. Soloshenko⁴, V.Yu. Prokofiev⁵, A.E. Masloboeva¹, D.A. Sevrakov³, I.Yu. Bugrova¹

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation

²Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³Gazprom Neft Group of Companies, St. Petersburg, Russian Federation

⁴Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

⁵Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Kseniia Yu. Vasileva, e-mail: k.vasilyeva@spbu.ru

Abstract. To evaluate the origin of cavernous hydrocarbon reservoir in the Lower Devonian dolostones (Western Taimyr, eastern coast of the Gydan Peninsula), the host rocks and the infilling carbonate minerals were studied using an integrated approach, including petrographic, cathodoluminescence, isotopic, geochemical and fluid inclusion studies. This approach showed that limestones that accumulated in the open subtidal shelf zone underwent dolomitization in early diagenesis, and dolomites with a fine-crystalline matrix were formed; the dolostones were significantly compacted during subsequent subsidence and geostatic compaction. The dolostones underwent fracturing the Late Hercynian tectonic phase (Late Carboniferous – Permian); fractures are associated with fissure caverns. Both fractures and caverns are partially filled with high-temperature generations of dolomite, quartz and calcite; low negative $\delta^{18}\text{O}$ values and high positive Eu/Eu* anomalies confirm their hydrothermal genesis. Similarity in PAAS-normalized patterns of Rare Earth Elements in the host rock and vein (cavernous) carbonate mineral indicates that the source for the infilling carbonate was the host rock. The results obtained show the high potential of using the applied approach in establishing the stages of development of a carbonate reservoir and for predicting its distribution in the section and area.

Keywords: diagenesis, caverns, reservoir development, isotopic and geochemical studies, dolostone, Lower Devonian, Gydan Peninsula

Recommended citation: Vasileva K.Yu., Ershova V.B., Vilesov A.P., Okuneva T.G., Rybakova A.D., Soloshenko N.G., Prokofiev V.Yu., Masloboeva A.E., Sevrakov D.A., Bugrova I.Yu. (2025). Application of Lithological and Geochemical Approach to Determine the Genesis of Dolomite Cavernous Reservoir (Lower Devonian, Gydan Peninsula). *Georesursy = Georesources*, 27(1), pp. 114–124. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.1.22>

References

- Ahr W.M. (2008). *Geology of Carbonate Reservoirs*. New York: John Wiley and Sons, 277 p. <https://doi.org/10.1002/9780470370650>
- Alexander B.W., Bau M., Andersson P., Dulski P. (2008). Continently-derived solutes in shallow Archean seawater: Rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa. *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, 72, pp. 378–394. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.10.028>

Bai H., Huang W., Ma B., Wang W. (2020). Mesogenetic diagenesis of the Ordovician limestone in Yubei area, Tarim Basin, NW China. *Carbonates Evaporites* 35, 77. <https://doi.org/10.1007/s13146-020-00610-8>

Breislin C.J., Banks V.J., Crowley S.F., Marshall J.D., Millar I., Riding J.B., Hollis C.E. (2022). Mechanisms controlling the localisation of fault-controlled hydrothermal dolomitisation, Derbyshire Platform, UK. *The Depositional Record*, 9(3), pp. 734–758. <https://doi.org/10.1002/dep.2.214>

Bukatova E.M., Uzhegova Yu.A., Pogrebnyuk S.A., Fedorov S.A., Vilesov A.P., Peretolchin K.A., Morozov N.V., Granovskii A.M. (2022). Oil and gas potential prospects of the Ordovician-Carboniferous deposits for West Taimyr under limited data conditions. *PRONEFT. Professional'no o nefti*, 7(4), pp. 28–39. (In Russ.)

Choquette P.W., Pray, L.C. (1970). Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54, pp. 207–250. <https://doi.org/10.1306/5D25C98B-16C1-11D7-8645000102C1865D>

Dan Y., Lin L., Liang B., Zhang Q., Yu Y., Cao J., Li J. (2018). Eogenetic Karst Control of Carbonate Reservoirs during a Transient Exposure: A Case Study of the Ordovician Yingshan Formation in the Northern Slope of the Tazhong Uplift, Tarim Basin, China. *Minerals*, 8(8), 342. <https://doi.org/10.3390/min8080345>

Dunham R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *AAPG*, 1, pp. 108–121. <https://doi.org/10.1306/M1357>

Davies G.R., Smith L.B. (2006). Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 90, pp. 1641–1690. <https://doi.org/10.1306/05220605164>

Dristas J.A., Martínez J.C., van den Kerkhof A.M., Massonne H.J., Theye T., Frisicale M.C., Gregori D.A. (2017). Hydrothermal karst and associated breccias in Neoproterozoic limestone from the Barker-Villa Caciue area (Tandilia belt), Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 76(7), pp. 182–197. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.03.002>

Flügel E. (2010). *Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application*. Second Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 984 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2>

Folk R.L. (1965). Some aspects of recrystallization in ancient limestones. L. C. Pray, and R. S. Murray, eds. *Dolomitization and Limestone Diagenesis*: Tulsa, OK, SEPM Special Publication, 13, pp. 14–48.

Fu Q., Qing H., Bergman K. M. (2006). Dolomitization of the Middle Devonian Winnipegosis carbonates in south-central Saskatchewan, Canada. *Sedimentology*, 53(4), pp. 825–848. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00794.x>

Koeshidayatullah A., Corlett H., Stacey J., Swart P., Boyce A., Robertson H., Whitaker F., Hollis C. (2020). Evaluating new fault-controlled hydrothermal dolomitization models: Insights from the Cambrian Dolomite, Western Canadian Sedimentary Basin. *Sedimentology*, 67(6), pp. 2945–2973. <https://doi.org/10.1111/sed.12729>

Liang J., Liu S., Li L., Dai J., Li X., Mou C. (2022). Geochemical Constraints on the Hydrothermal Dolomitization of the Middle-Upper Cambrian Xixiangchi Formation in the Sichuan Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.927066>

Machel H.G. (2004). Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal. *Geological Society*, 235, pp. 7–63. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.235.01.02>

Michard A., Albarède F. (1986). The REE content of some hydrothermal fluids. *Chem. Geol.*, 55, pp. 51–60. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90127-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90127-0)

Mongelli G., Sinisi R., Paternoster M., Perri F. (2018). REEs and U distribution in P-rich nodules from Gelasian Apulian Tethyan carbonate: A genetic record. *J. Geochem. Explor.*, 194, pp. 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.geexplo.2018.07.010>

Moore C.H., Wade W.J. (2013). Carbonate reservoirs porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework. Amsterdam, Netherlands; Oxford, England: Elsevier, 389 p.

Peretolchin K.A., Ershova V.B., Khudoley A.K., Nilov S.R. (2022). Tectonic history of the junction zone of the Taimyr fold-thrust belt and the structures of the Gydan Peninsula. *PRONEFT. Professional'no o nefii*, 7(4), pp. 83–93. (In Russ.)

Sibley D.F., Gregg J.M. (1987). Classification of dolomite rock textures. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57, pp. 967–975. <https://doi.org/10.1306/212F8CBA-2B24-11D7-8648000102C1865D>

Vilesov A.P., Chertina K.N. (2020). Paleokarst, hydrothermal karst and karst reservoirs of the Franian reefs of the Rybkinsky group. *Georesursy = Georesources*, 22, pp. 15–28. (In Russ.)

Vilesov A.P., Ershova V.B., Solovyeva A.D. (2022). Lithological and sedimentological characteristics of the Paleozoic of the West Taimyr potential oil and gas bearing area (according to drilling data). *PRONEFT. Professional'no o nefii*, 7(4), pp. 14–27. (In Russ.)

Yapaskurt O.V. Stadial analysis of lithogenesis (1994). Moscow: Moscow State University, 142 p. (In Russ.)

Yurchenko A., Voropaev A., Kozlova E., Morozov N., Spasennykh M. (2021). Application of the Data on $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of Carbonates for the Study of Unconventional Reservoirs on the Example of the Bazhenov Source Rocks, Western Siberia, Russia. *Geoscience*, 11(7), pp. 264–280. <https://doi.org/10.3390/geosciences11070264>

Zheng H., Ma Y., Chi G., Qing H., Liu B., Zhang X., Shen Y., Liu J., Wang Y. (2019). Stratigraphic and Structural Control on Hydrothermal Dolomitization in the Middle Permian Carbonates, Southwestern Sichuan Basin (China). *Minerals*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/min9010032>

Zinchenko I.A., Morozov N.V., Peretolchin K.A., Kurkin A.A., Pogrebnyuk S.A. (2022). History of development of petroleum systems within the West Taimyr potential oil and gas bearing area based on basin modeling results. *PRONEFT. Professional'no o nefii*, 7(4), pp. 124–133. (In Russ.)

Zhou Z., Wang X., Tang X., Wang W., Zhou H., Yang Y., Wen L., Huo F., Pei S. (2023). Karst paleotopography on top of the Dengying Formation and petroleum geological significance in the Central Sichuan Basin, China. *Energy Exploration & Exploitation*, 41(2), pp. 451–480. <https://doi.org/10.1177/01445987221143580>

About the Authors

Kseniya Yu. Vasilyeva – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, St. Petersburg State University

7/9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

e-mail: k.vasilyeva@spbu.ru

Victoria B. Ershova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, St. Petersburg State University

7/9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation e-mail: v.ershova@spbu.ru

Alexander P. Vilesov – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Expert on the sedimentology of carbonate reservoirs, Gazprom нефт Group of Companies

75–79 liter D, Moika River emb., 190000, St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: Vilesov.AP@gazpromneft-ntc.ru

Tatiana G. Okuneva – Researcher, Laboratory of Physical and Chemical Research, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

15 Akademik Vonsovskiy st., Yekaterinburg, 620010, Russian Federation

e-mail: okunevatatjana@mail.ru

Anna D. Rybakova – Research Engineer, Laboratory of Physical and Chemical Research, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

15 Akademik Vonsovskiy st., Yekaterinburg, 620010, Russian Federation

Natalia G. Soloshenko – Head of the group, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

15 Akademik Vonsovskiy st., Yekaterinburg, 620010, Russian Federation

e-mail: soloshenko@igg.uran.ru

Vsevolod Yu. Prokofiev – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences

35 Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russian Federation

e-mail: vpr@igem.ru

Anna E. Masloboeva – Research Engineer, St. Petersburg State University

7/9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

e-mail: masloboeva0713@gmail.com

Denis A. Sevryukov – Deputy project manager for geology and development, Gazprom нефт Group of Companies

22, Sinopskaya emb., 191167, St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: Sevryukov.DA@tmn.gazprom-neft.ru

Irina Yu. Bugrova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, St. Petersburg State University

7/9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

e-mail: i.bugrova@spbu.ru

Manuscript received 8 October 2024;

Accepted 3 March 2025;

Published 30 March 2025

© 2025 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)