



## Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 552.54:552.14:553.08

DOI: 10.19110/geov.2024.7.1

### Флюидный режим образования вторичных доломитов в палеозойских карбонатных коллекторах Хасырейского месторождения (вал Гамбурцева)

Т. В. Майдль, Н. В. Сокерина, М. С. Нечаев, И. Л. Ульныров, С. И. Исаенко

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар  
maydl@geo.komisc.ru

Актуальность исследования определяется поиском залежей углеводородов в отложениях нижнепалеозойского комплекса, с которым связаны основные перспективы прироста запасов Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, и разработкой прогноза строения резервуаров комплекса на основе лучшего понимания процессов формирования карбонатных коллекторов.

Целью исследования является получение данных о параметрах флюидного режима образования вторичных доломитов в палеозойских карбонатных коллекторах Хасырейского месторождения (вал Гамбурцева). Для этого были изучены первичные флюидные включения в доломитовых и ангидритовых цементах выполнения каверновых пустот пород-коллекторов.

В результате исследования установлено, что включения содержат до 10 об. % газовой фазы, которая представлена метаном и парами воды. Жидкая фаза характеризуется существенно хлоридно-кальциевым составом, соленость равна 13.5–23.5 мас. % NaCl-экв. Приведенные данные могут указывать на образование каверн и цементов вторичных доломитов из умеренно-температурных растворов высокой солёности, которые образуются в результате смешения седиментационных (первично морских) вод и рассолов гидротермальных источников. Продукты растворения эвапоритов в присутствии углеводородов и процессы восстановления сульфатов являются наиболее вероятным источником и поставщиком флюидов, как образования в породе каверн выщелачивания, так и выполняющих их цементов. Флюиды могли поступать в верхние этажи разреза из гидротермальных источников зон фундамента и нижних горизонтов осадочного чехла по системе разломов и трещин во время тектонической активизации.

**Ключевые слова:** *гомогенизация, криотермометрия, флюидные включения, вторичный доломит, карбонатный резервуар*

### Fluid regime of secondary dolomite formation in Paleozoic carbonate reservoirs of the Khasyrey deposit (Gamburtsev swell)

T. V. Maydl, N. V. Sokerina, M. S. Nechaev, I. L. Ulnyrov, S. I. Isaenko

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The search for hydrocarbon deposits in the sediments of the Lower Paleozoic complex of the Timan-Pechora oil and gas province, which are associated with the main prospects for increasing reserves, is a relevant topic for research. It is necessary to understand the formation processes of carbonate reservoirs within the complex under consideration to develop a strategy for predicting the structure of the complex reservoirs.

Obtaining data on the parameters of the fluid regime of the formation of secondary dolomites in the Paleozoic carbonate reservoirs of the Khasyrey field (Gamburtsev swell) was the aim of the study. We studied primary fluid inclusions in dolomite and anhydrite cements filling vuggy voids in reservoir rocks.

We showed that the inclusions contained up to 10 vol. % of the gas phase, which was represented by methane and water vapor. The liquid phase was characterized by a substantially chloride-calcium composition, the salinity is 13.5–23.5 wt. % NaCl-eq. These data might indicate the formation of cavities and cements of secondary dolomites from moderate-temperature solutions of high salinity, which were formed as a result of mixing sedimentation (primary marine) waters and brines of hydrothermal vents. The products of evaporite dissolution in the presence of hydrocarbons and sulfate reduction processes were the most likely source and supplier of the fluids, both the formation of leaching caverns in the rock and the cements performing them. Fluids could enter the upper floors of the section from hydrothermal sources in the basement zones and lower horizons of the sedimentary cover through a system of faults and cracks during tectonic activation.

**Keywords:** *homogenization, cryothermometry, fluid inclusions, secondary dolomite, carbonate reservoir*

**Для цитирования:** Майдль Т. В., Сокерина Н. В., Нечаев М. С., Ульныров И. Л., Исаенко С. И. Флюидный режим образования вторичных доломитов в палеозойских карбонатных коллекторах Хасырейского месторождения (вал Гамбурцева) // Вестник геонаук. 2024. 7(355). С. 3–12. DOI: 10.19110/geov.2024.7.1

**For citation:** Maydl T. V., Sokerina N. V., Nechaev M. S., Ulnyrov I. L., Isaenko S. I. Fluid regime of secondary dolomite formation in Paleozoic carbonate reservoirs of the Khasyrey deposit (Gamburtsev swell). Vestnik of Geosciences, 2024, 7(355), pp. 3–12, doi: 10.19110/geov.2024.7.1



## Введение

Породы-коллекторы продуктивных толщ  $S_2-D_1$  северо-востока Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции представлены практически исключительно вторичными доломитами, в формировании пустотного пространства которых принимают участие поры, каверны и трещины (Майдль, 1989; Душин и др., 2016; Жемчугова, Маслова, 2020; Ульныров, Майдль, 2023). Коллекторские параметры в доломитовых породах сильно варьируются, и зависят от прохождения процессов доломитизации и/или рекристаллизации относительно исходной кристаллической структуры и образования вторичной пористости. Палеозойские доломиты часто более пористые, чем связанные с ними известняки. Последовательность процессов и относительное время доломитизации важны для понимания происхождения пористости в любом конкретном теле доломитов.

Крупные доломитовые тела — обычное явление в горных породах, и большинство исследователей считают их результатом реакции замещения с участием поровых вод, привнесом Mg и удалением Ca (Land, 1985; Hardie, 1987). В последние годы возрастает понимание того, что замещающая доломитизация требует не только благоприятных геохимических условий, но и эффективного механизма циркуляции потоков жидкости. И большинство современных моделей генезиса массивных доломитов по существу являются гидрологическими (Machel, 2004).

Проблема прогноза геометрии доломитовых тел, их связности и распределения в них коллекторских свойств решается с помощью двух- и трехмерных количественных моделей реактивного транспорта (RTM). Они объединяют геохимические условия и реакции с характером флюидных потоков и основаны на исследовании процессов доломитизации и связанных с ними диагенетических реакций карбонатов. Существующие модели можно дифференцировать по трем фундаментальным драйверам, которые управляют циркуляцией флюидов, необходимых для доломитизации: высотный (топографический) градиент напора метеорной и/или морской воды; градиент плотности жидкости из-за изменений солёности и/или температуры; градиент давления седиментационного и/или тектонического уплотнения. Потоки жидкости (циркуляция) обычно являются продуктом одновременного воздействия нескольких различных движущих сил. К настоящему времени разработаны модели доломитизации для четырех различных гидрогеологических систем: 1) рефлюкса рассола, 2) зоны смешения, 3) геотермальной циркуляции и 4) гидротермальной циркуляции, контролируемой разломами (Machel, 2004; Whitaker, Smart, Jones, 2004; Benjakul R. et al., 2020).

Характер доломитизации пород определяет их коллекторские свойства, поэтому моделирование активно внедряется в практику разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений. От качества «первичных» данных о параметрах флюидов зависят и выбор концепции моделирования эпигенетических процессов, и точность прогноза распространения «улучшенных» коллекторов. Одним из главных поставщиков таких данных являются включения первичных растворов в растущих кристаллах, исследование кото-

рых позволяет судить о составе и температуре растворов, участвующих в преобразованиях породы-коллектора.

Представленная работа является первым опытом микротермометрического анализа флюидных включений в доломитовых коллекторах нашего региона. Целью работы являлось установление состава и температурного режима минералообразующих сред, сохранившихся в доломитовом и ангидритовом цементных трещиновато-кавернозных доломитов Хасырейского месторождения вала Гамбурцева.

## Методы исследований

Исследования литологического состава и пустотного пространства образцов пород проводились с помощью микроскопа Leica DM-2700 M, а также на электронном микроскопе TESCAN VEGA3 LMN, оснащённом энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) «Oxford Instruments X-Max 50 мм<sup>2</sup>» (ЦКП «Геонаука», г. Сыктывкар). Анализ изотопов углерода и кислорода проведен в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на масс-спектрометре DELTA V Advantage. Значения изотопных коэффициентов определялись по стандартам PDBNBS18 и NBS19 (TS-limestone) для углерода и SMOW — для кислорода. Погрешность определения обоих коэффициентов не превышала  $\pm 0.1$  ‰.

Изучение флюидных включений проведено в двух образцах из керна скв. 35-Хасырейская, отобранных из нижнедевонской и верхнесилурийской толщ.

Анализировались включения ромбоэдрического доломитового и позднего ангидритового цементов. Для выяснения генезиса вторичной минерализации в двусторонне полированных пластинах проводилось изучение флюидных включений методами гомогенизации и криометрии с использованием термо-криостоллика THMSG600 фирмы Linkam. Погрешность измерений  $\pm 0.2$  °C при отрицательных температурах и  $\pm 0.5$  °C при положительных. Солёность растворов во включениях измерялась по температуре плавления льда (Bodnar, Vityk, 1994). Солевой состав включений определялся по температуре эвтектики водно-солевой системы (Борисенко, 1977). Газовый состав индивидуальных включений изучался частично на высокоразрешающем рамановском спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon) при комнатной температуре. Для регистрации спектров применялась решетка спектрометра 600 ш/мм, размер конфокального отверстия составлял 300 и 500 мкм, щель — 100 мкм, мощность возбуждающего излучения He-Ne лазера (длина волны 632.8 нм) — 20 мВт, Ar<sup>+</sup> лазера — 120 мВт (514,5 нм). Изучение флюидных включений проводилось в двусторонне полированных пластинах толщиной 0.3–0.5 мм. Часть спектров получена на рамановском микроскопе Ramos M520 (SOL instruments, Беларусь). Параметры регистрации спектров: твердотельный лазер (выходная мощность 80 мВт,  $\lambda = 532$  нм), решетка спектрометра 600 ш/мм, размер конфокального отверстия — 100 мкм, объектив  $\times 50$  (микроскоп Nexcore NE910, Китай), время накопления сигнала — 10 секунд, количество измерений на одном участке спектрального диапазона — 1. Регистрация спектров осуществлялась при комнатной температуре.



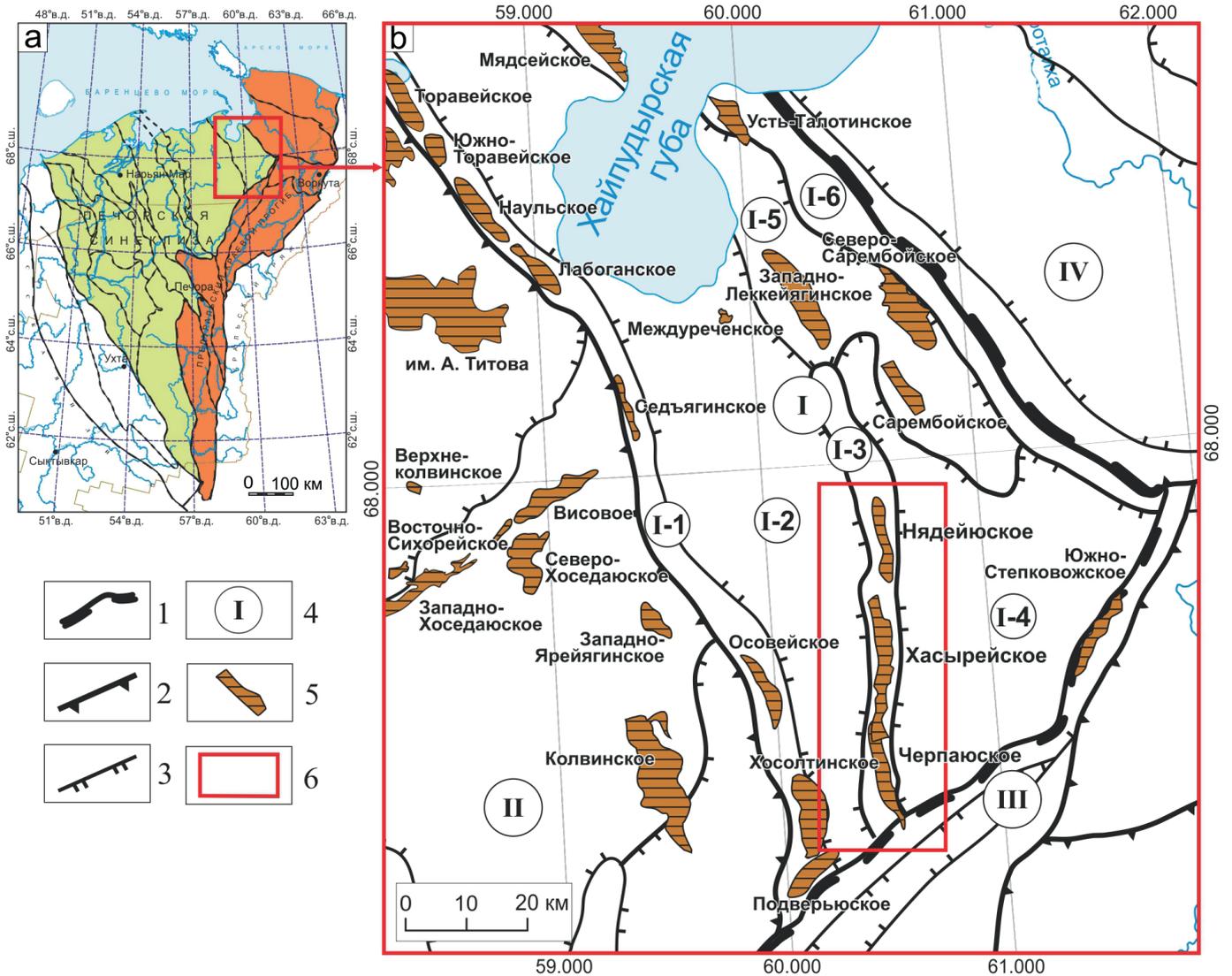
**Геологическое положение и литологическая характеристика**

Хасырейское месторождение приурочено к одноименному локальному поднятию вала Гамбурцева, расположенному в центральной части Варандей-Адзвинской структурно-тектонической зоны (ВАСЗ) (рис. 1). Ее современный структурный план сложился в результате разнонаправленных субвертикальных и субгоризонтальных движений, тесно связанных с заложением и геологической эволюцией Уральской и Пай-Хойско-Новоземельской складчатых систем (Малышев, 2002). Вал Гамбурцева представляет собой серию расположенных кулисами чрезвычайно узких

складок с относительно плоскими сводами, ограниченными дизъюнктивными нарушениями с запада и востока (Сотникова, 2009).

В составе нижнедевонских отложений ( $D_1$ ) вала Гамбурцева выделяются три пачки (снизу вверх): доломитовая ( $D_1dol$ ) в овинпармском горизонте, глинисто-доломитовая, ангидрито-доломитовая в сотчемкыртинском горизонте. Покрышкой залежей являются плотные аргиллиты, мергели тиманского и саргавского горизонта верхнего девона.

На Хасырейском месторождении в составе пачки  $D_1dol$  выделяется ряд интервалов, породы которых различаются морфологией пустотного пространства и литолого-петрофизическими свойствами (рис. 2).



**Рис. 1.** Обзорно-тектоническая карта района исследования: а — обзорная карта Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, б — карта тектонического районирования Варандей-Адзвинской структурной зоны (Белонин и др., 2004). Условные обозначения: 1–3 — границы тектонических элементов: 1 — надпорядковых, 2 — первого порядка, 3 — второго порядка; 4 — номера тектонических элементов: I — Варандей-Адзвинская структурная зона (I-1 — Вал Сорокина, I-2 — Мореюская депрессия, I-3 — Вал Гамбурцева, I-4 — Верхнеадзвинская депрессия, I-5 — Сарембой-Леккейягинский вал, I-6 — Талотинский вал), II — Хорейверская впадина, III — Гряда Чернышева, IV — Коротайхинская впадина; 5 — нефтяные месторождения; 6 — район работ

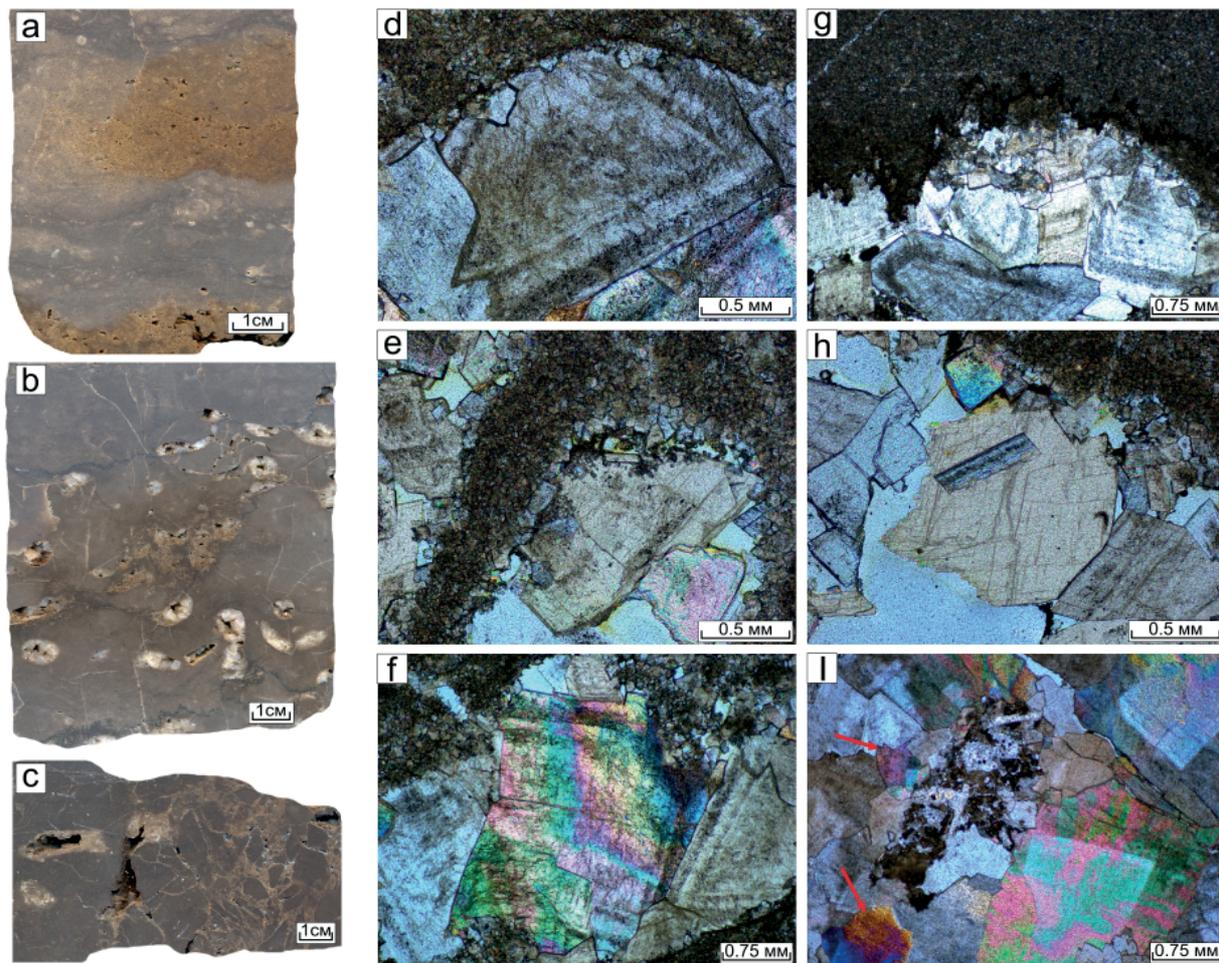
**Fig. 1.** Overview-tectonic map of the research area: а — overview map of the Timan-Pechora oil and gas province, б — map of the tectonic zoning of the Varandey-Adzva structural zone (Belonin et al., 2004). Symbols: 1–3 — boundaries of tectonic elements: 1 — superorder, 2 — first order, 3 — second order; 4 — numbers of tectonic elements: I — Varandey-Adzva structural zone (I-1 — Sorokin swell, I-2 — Morey depression, I-3 — Gamburtsev swell, I-4 — Upper Adzva depression, I-5 — Saremboj-Lekkeyaga swell, I-6 — Talota swell), II — Khoreyver depression, III — Chernyshev Ridge, IV — Korotaykha depression; 5 — oil fields; 6 — work area

Развитая в толще сеть трещин вторичной пористости и каверн способствует не только связности пластов пород-коллекторов овинпармского горизонта, но и (исходя из гидродинамики залежи) связывает их с силурийскими отложениями. Наиболее продуктивными являются отложения двух литологических типов. Первый тип представляют среднезернистые доломиты с низким содержанием глинистого материала и развитой межзерновой пористостью с доломитизацией (рис. 2, а), часто приуроченной к зонам развития микротрещин (рис. 2, с).

Второй тип пород-коллекторов формируют доломиты замещения отложениями нижней сублиторали. Они имеют первично известковый состав с крупными остатками колоний и раковин «рассеянных» в иловой матрице (рис. 2, b, c), относимых к отложениям нижней сублиторали. Доломитизация ила проходила относительно равномерно и привела к его замещению плотным агрегатом тонко-мелкозернистого доломита. Раковины и крупные обломки табулят, строматопорат обычно не образуют скоплений с «каркасной структурой», а погружены в иловую массу. Они преобразовывались по иным сценариям и в более поздние сроки. Их остатки либо полностью, либо частично замещены доломитом и кремнием, либо выщелочены до

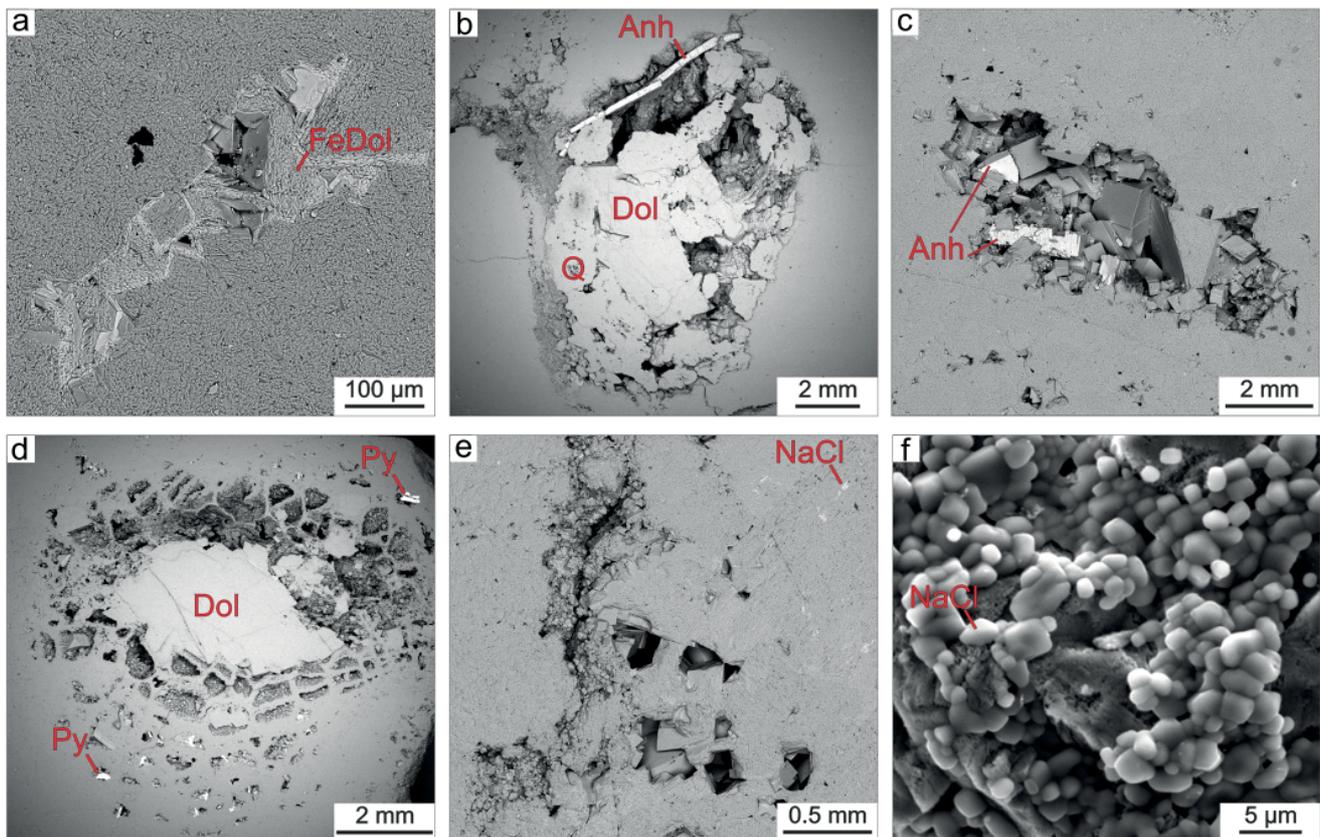
образования каверн, немного заполненных цементами крупнокристаллического доломита (рис. 2, d-h), иногда с кристаллами ангидрита. Аналогичные цементы заполняют также зоны дробления пород и трещины (рис. 2, i). Кристаллы доломита часто имеют зональное, подчеркнутое обилием включений, или блочное строение. Встречаются кристаллы «седловидной» формы (рис. 2, f). В ряде случаев грани кристаллов демонстрируют отчетливые следы растворения (рис. 2, e, h).

Среди вторичных доломитов выделяются несколько морфоструктурных разновидностей, сохраняющих реликты или полностью замещающих первичные структуры известняков. Микроскопическое и электронно-микроскопическое исследования позволяют выделить две-три генерации доломитов, отличающихся размером и морфологией, а часто и составом примесей. Доломиты первой и отчасти второй генерации характеризуются несколько повышенным содержанием кальция. Кристаллы второй генерации, слагающие зоны и участки рекристаллизации, демонстрируют незначительную примесь железа при недостатке магния. Содержание атомов железа составляет 0.2–0.5 ат. %. Третья генерация, представленная крупными кристаллами доломитовых цементов, часто содержит уже от 1.4 % до 9.8 ат. % железа, обогащающих внешние зоны



**Рис. 2.** Фото пор, трещин и каверн в образцах и микрофотографии доломитовых и ангидритодоломитовых цементов пород-коллекторов доломитовой пачки скв. 35-Хасырейская (гл. 2300–2376,6 м.): а – обр. 7/1; б – обр. 10/2; в – обр. 5/2; фото шлифов: обр. d–h – обр. 10/2; i – обр. 8/6. Красные стрелки указывают на зерна ангидрита. Пояснения в тексте

**Fig. 2.** Photos of pores, cracks and caverns in samples and microphotographs of dolomite and anhydrite-dolomite cements of reservoir rocks of the dolomite member of well 35-Khasyreyskaya (int. 2300–2376.6 m.): а – sample 7/1; б – sample 10/2; в – sample 5/2; photo of thin sections: обр. d–h – sample 10/2; i – sample 8/6. Red arrows indicate anhydrite grains. Explanations in the text



**Рис. 3.** Электронно-микроскопическое исследование процессов вторичной минерализации.

Вторичные доломитовые цементы в пустотах выщелачивания: доломит, цементирующий пустоты, содержит примесь железа и отличается более ярким отражением кристаллов или зон кристаллов, чем доломиты матрикса (a–d); выделения в полостях каверн кристаллических агрегатов ангидрита (b, c), кремния (b) и пирита (d); вторичные поры доломитизации и выделения хлористого натрия в матриксе (e); хлористый натрий на поверхности доломита (f). Снимки a–e — в режиме отраженных электронов

**Fig. 3.** Electron microscopic study of secondary mineralization processes.

Secondary dolomite cements in leaching voids: dolomite cementing the voids contains an admixture of iron and is characterized by a brighter reflection of crystals or zones of crystals than matrix dolomites (a–d); precipitation of crystalline aggregates of anhydrite (b, c), silicon (b) and pyrite (d) in the cavities; secondary pores of dolomitization and release of sodium chloride in the matrix (e); sodium chloride on the surface of dolomite (f); pictures a–e — in the mode of reflected electrons

кристаллов (рис. 3, a). В меньшем количестве в цементных заполнениях присутствуют кристаллы ангидрита, обычно более поздние, чем доломитовые (рис. 3, b, c).

Цементы лишь частично заполняют пустоты, оставляя некоторый объем пространства свободным. Достаточно часто встречаются микроскопления кристаллов галита, выполняющих микротрещины и микропоры в доломитах (рис. 3, e, f). Это позволяет связывать их генезис с глубинными растворами, подпитываемыми рассолами погруженных соленосных толщ ордовика. Выделения пирита иногда имеют необычную пластинчатую форму зерен, выполняющих узкие промежутки между кристаллами доломита. Иногда сохраняются зерна с равным содержанием атомов железа и серы, возможно, реликты-свидетели изменений окислительно-восстановительных обстановок и редукции сульфатов.

Цементы, частично заполняющие каверны и пустоты расширения трещин из «рыхлых» агрегатов крупных кристаллов доломита с ровными или искривленными «седловидными» поверхностями граней, большинство исследователей связывают с геотермальными или гидротермальными растворами. Любые растворы, поступающие из нижних горизонтов осадоч-

ного чехла, имеют повышенную относительно вмещающих пород температуру и могут рассматриваться как геотермальные (Whitaker, Xiao, 2010). Подтверждением этому считают явное пространственное совпадение процессов цементации, пустот выщелачивания и трещиноватости пород (Davies, Smith, 2006; Du et al., 2018; Warren, 2019). Для суждения о генезисе доломитовых цементов, отнесении их к продуктам геотермальных или гидротермальных флюидов нужны данные, позволяющие судить о температурном режиме их образования. С этой целью нами были проведен изотопный анализ доломитовых фаз разных генераций и исследованы флюидные включения, обнаруженные в крупно-грубозернистых кристаллах доломита и ангидрита из карбонатных пород-коллекторов в керне скв. 35-Хасырейская.

#### Изотопные отношения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ доломитов и доломитовых цементов

Было проведено изучение состава изотопов в разных доломитовых фазах кернов скважин 35-Хасырейская и 25-Черпаюская. Проанализировано 7 образцов доломитовых пород гребенского и овинпармского гори-

зонтов. В каждом образце опробовались: крупнокристаллический молочно-белый доломит выполнения пустот и трещин (1), среднезернистый светло-серый доломит рекристаллизации матрицы (2) и мелкозернистый серый доломит менее измененных участков матрицы (3) (табл. 1). Все образцы демонстрируют облегчение изотопного состава по обоим параметрам от более раннего мелкозернистого доломита (3) к более позднему крупнозернистому доломиту (1). Амплитуда облегчения в отдельных образцах составляет 0.6–1.4 ‰ для значений  $\delta^{13}\text{C}$  и 2.5–3.8 ‰ для величины  $\delta^{18}\text{O}$ .

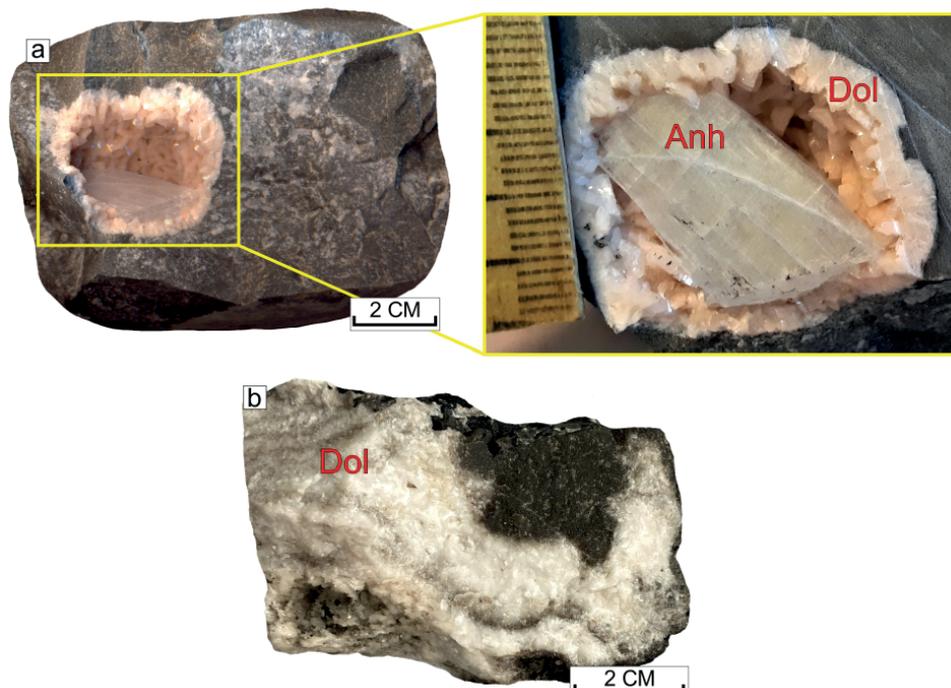
При этом более легкими по изотопам являются пробы из образца тектонической брекчии с признаками сдвиговой деформации. В менее нарушенных образцах наиболее легкими по изотопам являются доломитовые цементы поздней генерации. В целом пробы разных генераций демонстрируют облегчение изотопов по мере укрупнения размера кристаллов — от ранних фаз к фазам более поздним. Аналогичные результаты получены для доломитов овинпармского горизонта ручья Дэршор (Майдль, Нечаев, 2023). В них крупнозернистый доломит прожилков и цемент-

тов был обеднен ( $\delta^{13}\text{C}$  от 0.0–1 до 5 ‰, а  $\delta^{18}\text{O}$  от 1–3 до 6–7 ‰) по сравнению с доломитом диффузной доломитизации матрикса. Наибольшее облегчение фиксировалось для трещиноватых пород. При этом, совокупность проб крупнозернистых доломитовых цементов демонстрирует значимую ковариацию параметров  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ , в выборке проб матричного доломита линейная связь между параметрами отсутствует (Майдль, Нечаев, 2023).

Как известно, величина  $\delta^{18}\text{O}$  широко используется в качестве индикаторов диагенеза и катагенеза карбонатных пород, хотя из-за влияния как температуры флюида, так и изотопного состава воды, трактовка значений этого параметра неоднозначна. Низкие значения  $\delta^{18}\text{O}$  могут быть следствием: а) пресноводного диагенеза и инфильтрационных вод, обедненных  $\delta^{18}\text{O}$ ; б) растворов повышенных температур в зоне катагенеза (Swart P.K., 2015). Следовательно, карбонаты, сформированные при высоких температурах, могут иметь пониженные значения  $\delta^{18}\text{O}$ , сопоставимые с воздействием метеорного диагенеза, и их изотопный состав не дает однозначного ответа о природе флюидов.

**Таблица 1.** Параметры  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  доломитов разных генераций  
**Table 1.** Parameters  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of dolomites of different generations

Образец / Sample	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰ VPDB			$\delta^{18}\text{O}$ , ‰ SMOW		
	1	2	3	1	2	3
ХСР 4/2	-1.81	-1.86	-1.26	23.53	24.82	27.06
ХСР 6/5	-1.60	-1.44	-1.18	23.63	25.86	27.03
ХСР 10/2	-0.78	-0.51	0.55	22.97	26.79	26.12
ХСР 11/2	-2.39	0.16	-0.63	23.74	26.02	26.92
ХСР 15/2	-7.00	-5.82	–	23.27	26.86	–
ЧРП 18/2	-1.35	-0.65	0.04	26.89	26.46	27.47
ЧРП 18/5	-0.76	-0.17	-0.38	26.37	25.10	27.58



**Рис. 4.** Фото образцов на анализ флюидных включений из скв. 35-Хасырейская: а — обр. 3/3; б — обр. 13/3

**Fig. 4.** Photos of samples for the analysis of fluid inclusions from well 35-Khasyreyskaya: a — sample 3/3; b — sample 13/3



### Результаты исследования флюидных включений

Для определения условий минералообразования нами изучены первичные включения в доломите и ангидрите, цементирующих каверну по выщелоченному органогенному обломку (рис. 4, а, обр. 3/3) и доломитовому цементу выполнения внутренних пустот замещенного остатка колонии табулят (рис. 4, б, обр. 13/3). К первичным отнесены те включения, которые встречаются поодиночке или небольшими группами.

Для доломита (обр. 3/3) характерны двухфазовые первичные включения с газовой фазой до 10 об. %. Они имеют разнообразную, иногда с элементами огранки форму, их размер не превышает 20 мкм (рис. 4, а). Температура эвтектики в жидкой фазе изменяется в пределах  $-62...-64$  °С, что характерно для водных растворов хлорида кальция с примесями. Плавление происходит при  $-19...-19.3$  °С, что свидетельствует о том, что соленость раствора равна 21–22.2 мас. % NaCl-экв. Гомогенизация включений происходит при 102–120 °С (табл. 2, рис. 5).

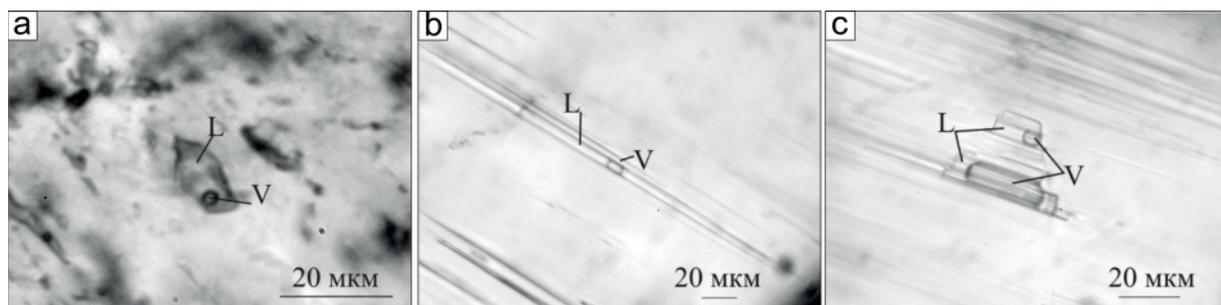
Доломит (обр. 13/3) полупрозрачный и отличается очень мелкими, не более 10 мкм, включениями неправильной формы. Двухфазовые первичные включения содержат газовую фазу до 10 об. %. Температура эвтектики жидкой фазы равна  $-68$  °С, на основании этого можно предположить присутствие солей хлорида кальция с примесями солей лития. Температура плавления, равная  $-21.5$  °С, свидетельствует о том, что концентрация солей близка 23.5 мас. % NaCl-экв.

Флюидные включения в ангидрите (обр. 3/3) отличаются крупным, часто более 100 мкм, размером и сильно вытянутой формой (рис. 5, б). Газовая фаза присутствует в них в небольшом количестве, менее 5 об. %. Температура эвтектики ( $-48...-60$  °С) характерна для хлоридов кальция с примесями. Плавление последней льдинки происходит при температурах  $-9...-18$  °С, что свидетельствует о том, что соленость раствора равна 13.5–21.0 мас. % NaCl-экв. Температура гомогенизации первичных флюидных включений равна 97–165 °С (табл. 2, рис. 6). При визуальном изучении отмечается большое количество вскрытых включений. Вскрытие,

**Таблица 2.** Результаты изучения флюидных включений в доломите и ангидрите в палеозойских карбонатных коллекторах Хасырейского месторождения

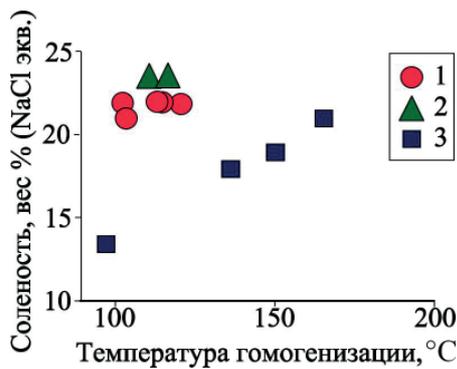
**Table 2.** Results of the study of fluid inclusions in dolomite and anhydrite in Paleozoic carbonate reservoirs of the Khasyrey field

№	ГФ об. % GP v. %	$T_{эвт}/T_e$	$T_{пл}/T_m$	Соленость, мас. % NaCl-экв Salinity, wt. % NaCl-eq	$T_{гом}/T_{hom}$	Примечания Notes
		°С				
Доломит (обр.3/3) / Dolomite (sample 3/3)						
1	5	-61	-18	21	103	первичное / primary
2	5	-62	-19.2	22.1	115	-//-
3	5–10	-63	-19.0	22	102	-//-
4	5–10	-64	-19.2	22.1	113	-//-
5	5	-62	-19	22	120	-//-
6	5	-63	-19.3	22.2	113	-//-
Доломит (обр.13/3) / Dolomite (sample 13/3)						
7	10	-68	-21.5	23.5	110	первичное / primary
8	5–10	-//-	-//-	23.5	116	-//-
9	5	-	-	-	110	-//-
Ангидрит (обр.3/3) / Anhydrite (sample 3/3)						
10	До 5	-52	-15	19	150	первичное / primary
11	-//-	-52	-9	13.5	97	-//-
12	-//-	-48	-14	18	136	-//-
13	-//-	-60	-18	21	165	-//-



**Рис. 5.** Включения: а — первичные в доломите (обр.3/3); б — первичные в ангидрите 3/3; в — гетерогенного захвата в ангидрите (обр.3/3). V — газовая фаза, L — жидкая фаза

**Fig. 5.** Inclusions: а — primary in dolomite (sample 3/3); б — primary in anhydrite (sample 3/3); в — of heterogeneous capture in anhydrite (sample 3/3). V — gas phase, L — liquid phase



**Рис. 6.** Соотношение температуры гомогенизации и солености жидкой фазы в флюидных включениях: 1 — в доломите 3/3; 2 — в доломите 13/3; 3 — в ангидрите 3/3

**Fig. 6.** The ratio of the homogenization temperature and salinity of the liquid phase in fluid inclusions: 1 — in dolomite 3/3; 2 — in dolomite 13/3; 3 — in anhydrite 3/3

вероятно, произошло во время изготовления пластинок. Кроме того, довольно часто наблюдаются включения с разным соотношением газовой и жидкой фазы (рис. 5, с). Для термометрии такие включения непригодны, так как образовались, скорее всего, в результате гетерогенного захвата, либо при контакте пластинок ангидрита с водой и спиртом на стадии изготовления.

Для определения газового состава флюидных включений проведено рамановское исследование. В доломитах наблюдается очень большой фон (рис. 7, а). Виден пик воды, редко — метана. Пики других газов отсутствуют или перекрыты фоном. Возможно, некоторые газы присутствуют в количествах ниже предела определения. В ангидритах фон заметно ниже, но, как и в доломитах, диагностируется вода, реже с метаном (рис. 7, б).

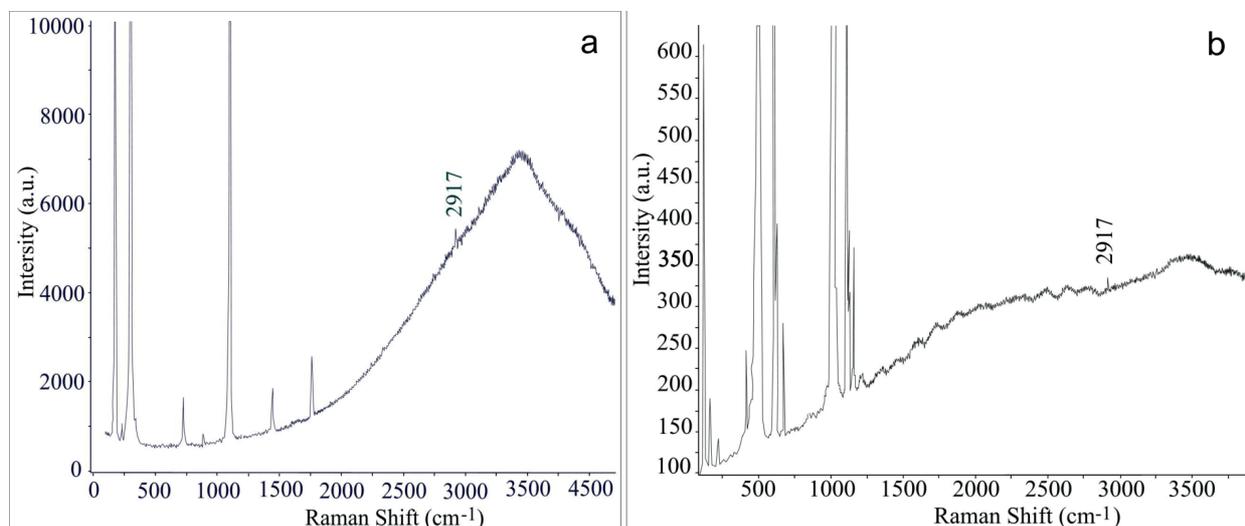
### Обсуждение результатов

По морфологическим и геохимическим особенностям крупнозернистый ромбоэдрический или «седловидный» доломит выполнения пустот не отличает-

ся от аналогичных доломитов, описанных во многих разрезах катагенетически измененных карбонатных пород, включающих залежи углеводородов, воды древних водоносных горизонтов и рудные сульфидные месторождения типа долины Миссисипи — (MVT). Характерными признаками для них являются: послойное обогащение Fe, Mn и Ca, изменение изотопных отношений  $\delta^{13}\text{C}$  в диапазоне от слегка положительных до умеренно отрицательных значений и умеренно отрицательные значения  $\delta^{18}\text{O}$  (Warren, 2019).

В исследованных доломитах флюидные включения гомогенизируются при температуре от 102 до 120 °C. Соленость жидкой фазы флюидных включений равна 21.0–23.5 мас. % NaCl-экв, что значительно превышает соленость морской воды. В ангидрите, который является более поздним по времени образования, интервал температур гомогенизации включений несколько шире и составляет 97–165 °C. Соленость жидкой фазы изменяется в пределах от 13.5 до 21.0 мас. % NaCl-экв. Температуры эвтектики жидкой фазы включений в доломите и ангидрите предполагают наличие хлоридов кальция, но более низкая температура во включениях доломита может быть следствием примеси солей лития.

Полученные данные свидетельствуют, что кристаллизация цементов происходила из рассолов относительно умеренных температур с признаками прямой метаморфизации (накопления кальция) морских талассогенных вод. Как известно, метаморфизация сопровождается увеличением с глубиной общей минерализации подземных рассолов и увеличением концентраций ряда микроэлементов, достигающих максимальных величин в глубоких метаморфизованных рассолах хлоркальциевого типа (Краснов и др. 2004). В свете современных представлений о формировании седиментационных рассолов считается, что образование в них избыточных концентраций редких щелочных элементов происходит в результате взаимодействия с вмещающими породами первичных хлормагнезиевых рассолов, вследствие чего происходит метаморфизация их в хлоркальциевые рассолы (Крайнов и др., 2004), а вмещающие известняки постепенно замещаются доломитами. Максимальные же concentra-



**Рис. 7.** Рамановские спектры газовой фазы: а — в доломите; б — в ангидрите

**Fig. 7.** Raman spectra of the gas phase: a — in dolomite; b — in anhydrite



ции редких щелочных элементов приурочены к наиболее метаморфизованным рассолам, обладающим максимальными содержаниями кальция.

В рассольных водах литий накапливается в значительных количествах. Наиболее обогащены им внутрисолевые и надсолевые рассолы галогенных формаций (Крайнов и др., 2004).

Учитывая, что состав вод комплекса вала Гамбурцева и сопредельных территорий гряды Чернышева хлоридно-натриевый с высоким содержанием кальция, рассолы, законсервированные во включениях, являются более метаморфизованными, чем воды вмещающих пород. Присутствие в породах галита свидетельствует о напорном (илизионном) режиме поступления рассолов из нижних горизонтов осадочного чехла и их генетической связи с рассолами соленых толщ ордовика. Метановый состав газовой фазы включений может быть связан с процессами генерации и термальной дегградации углеводородов.

Интересным является тот факт, что температура гомогенизации включений в более позднем ангидриде выше, чем в доломите (рис. 3, 5). Вероятно, это связано с активизацией гидротермального процесса на более поздней стадии.

Важным является также то, что крупнозернистый доломит выполняет каверны и пустоты трещин, то есть его кристаллизацию предваряет процесс избирательного растворения — выщелачивания. Это накладывает требование — циркулирующие рассолы изначально должны быть агрессивны к карбонатным породам, насыщаясь минералами по мере циркуляции.

Растворение эвапоритов в присутствии углеводородов и продуктов термального восстановления сульфатов считается одним из наиболее вероятных источников рассолов, образующих седловидный доломит. Эти рассолы (как и рассолы магматического происхождения) отличаются повышенной кислотностью и могут быть химически очень агрессивны для известняков (Warren, 2019; Machel, 2001). При достаточно большом объеме растворения пород может формироваться гидротермальный карст (Gao et al., 2020).

## Заключение

В изученных нами верхнесилурийско-нижнедевонских разрезах скважин вала Гамбурцева морфологические и минералогические особенности вторичных преобразований пород-коллекторов дают основание полагать значительное участие в этом процессе термальных агрессивных растворов, поступавших по трещинным зонам из подстилающих отложений. Формирование зон трещинной проницаемости и «раскрытие» глубинных водно-углеводородных систем, вероятно, было приурочено к основным для провинции рубежам тектогенеза Р/Т — Т/Ј. Флюиды, принимавшие участие в образовании жильной минерализации продуктивных коллекторов вала Гамбурцева, характеризуются невысокой температурой 97–165 °С и повышенной соленостью. В них преобладают соли кальция, что соответствует характеристикам геотермальных рассолов, более измененным, чем воды вмещающих пород, включающим, вероятно, продукты растворения соленосных толщ ордовика и продуктов термальной сульфатредукции. Присутствие в породах галита сви-

детельствует о напорном (илизионном) режиме поступления рассолов из нижних горизонтов осадочного чехла и их генетической связи с рассолами соленых толщ ордовика.

*Работа проводилась в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 122040600010-8; FUUU-2022-0057).*

## Литература / References

- Белонин М. Д., Буданов Г. Ф., Данилевский С. А., Прищепина О. М., Теплов Е. Л. Тимано-Печорская провинция: геологическое строение, нефтегазоносность и перспективы освоения. СПб: Недра, 2004. 396 с.
- Belonin M. D., Budanov G. F., Danilevsky S. A., Prishchepina O. M., Teplov E. L. Timan-Pechora province: geological structure, oil and gas content and development prospects. St. Petersburg: Nedra, 2004, 396 p. (in Russian)
- Борисенко А. С. Изучение солевого состава растворов газозожидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Borisenko A. S. Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals using cryometry. Geology and Geophysics, 1977, No. 8, pp. 16–27. (in Russian)
- Душин А. С., Мельников А. В., Федоров А. И., Рыкус М. В. Новая флюидодинамическая модель карбонатного коллектора месторождения им. Р. Требса на основе синтеза геологических и промысловых данных // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 2. С. 13–23.
- Dushin A. S., Melnikov A. V., Fedorov A. I., Rykus M. V. New fluid dynamic model of the carbonate reservoir of the R. Trebs field based on the synthesis of geological and field data. Oil and Gas Business, 2016, V. 14, No. 2, pp. 13–23. (in Russian)
- Жемчужова В. А., Маслова Е. Е. Вторичная доломитизация как фактор, определяющий коллекторские свойства нижнедевонских отложений восточного борта Хорейверской впадины (Тимано-Печорский нефтегазоносный бассейн) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2020. № 3. С. 47–56.
- Zhemchugova V. A., Maslova E. E. Secondary dolomitization as a factor determining the reservoir properties of Lower Devonian deposits on the eastern side of the Khoreyver depression (Timan-Pechora oil and gas basin). Bulletin of Moscow University. Series 4: Geology, 2020, No. 3, pp. 47–56. (in Russian)
- Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швец В. М. Геохимия подземных вод: Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
- Krainov S. R., Ryzhenko B. N., Shvets V. M. Geochemistry of groundwater: Theoretical, applied and environmental aspects. Moscow: Nauka, 2004, 677 p. (in Russian)
- Майдль Т. В. Литология и коллекторы продуктивных карбонатных отложений нижнего девона вала Гамбурцева // Геология и ресурсы горючих ископаемых европейского Севера СССР (Труды Ин-та геологии Коми научного центра УрО РАН). Сыктывкар, 1989. С. 34–46.
- Maydl T. V. Lithology and reservoirs of productive carbonate deposits of the Lower Devonian of the Gamburtsev swell. Geology and resources of fossil fuels of the European North of the USSR (Proceedings of the Institute of Geology Komi SC UB RAS). Syktyvkar, 1989, pp. 34–46. (in Russian)



- Майдль Т. В., Нечаев М. С. Палеокарст, термальный карст нижнедевонских карбонатных резервуаров Тимано-Печорской провинции: характер проявления и диагностика // *Материалы Всероссийской научной конференции (с иностранным участием). Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, терригенных и карбонатных комплексов (Литол 2023)*. М.: ГЕОС, 2023. С. 104–107.
- Maydl T. V., Nechaev M. S. Paleokarst, thermal karst of the Lower Devonian carbonate reservoirs of the Timan-Pechora province: nature of manifestation and diagnostics. Proc. of the All-Russian Scientific Conference (with foreign participation). *Fundamental problems in the study of volcanic-sedimentary, terrigenous and carbonate complexes (Litol 2023)*. Moscow: GEOS, 2023, pp. 104–107. (in Russian)
- Мальшиев Н. А. Тектоника, эволюция и нефтегазоносность осадочных бассейнов европейского севера России. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 271 с.
- Malyshev N. A. Tectonics, evolution and oil and gas content of sedimentary basins of the European north of Russia. Yekaterinburg: UB RAS, 2002, 271 p. (in Russian)
- Сотникова А. Г. Варандей-Адзвинский авлакоген: зоны нефтегазонакопления в карбонатных среднеордовик-нижнедевонских отложениях и приоритетные направления геологоразведочных работ на углеводородное сырьё (суша, Печороморский шельф) // *Геология нефти и газа*. 2009. № 2. С. 10–21.
- Sotnikova A. G. Varandey-Adzva aulacogen: zones of oil and gas accumulation in carbonate Middle Ordovician-Lower Devonian deposits and priority directions of geological exploration for hydrocarbon raw materials (onshore, Pechora Sea shelf). *Geology of Oil and Gas*, 2009, No. 2, pp. 10–21. (in Russian)
- Ульныров И. Л., Майдль Т. В. Литология, условия осадконакопления и формирование пород-коллекторов верхнесилурийских карбонатных отложений вала Гамбурцева (Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция) // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2023. Т. 18. № 3. [http://www.ngtp.ru/rub/2023/26\\_2023.html](http://www.ngtp.ru/rub/2023/26_2023.html)
- Ulnyrov I. L., Maydl T. V. Lithology, sedimentation conditions and formation of reservoir rocks of the Upper Silurian carbonate deposits of the Gamburtsev swell (Timan-Pechora oil and gas province). *Oil and Gas Geology. Theory and practice*, 2023, V. 18, No. 3. [http://www.ngtp.ru/rub/2023/26\\_2023.html](http://www.ngtp.ru/rub/2023/26_2023.html) (in Russian)
- Benjakul R., Hollis C., Robertson H. A., Sonmenthal E. L., Whitaker F. F. Understanding controls on hydrothermal dolomitization: insights from 3D reactive transport modelling of geothermal convection // *Solid Earth*. 2020. Vol. 11. No. 6. P. 2439–2461. DOI: 10.5194/se-11-2439-2020
- Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignano: Siena. 1994. P. 117–130.
- Davies G. R., Smith L. B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview // *Bulletin American Association Petroleum Geologists*. 2006. V. 90. P. 1641–1690.
- Du Y., Fan T., Machel H. G., Gao Z. Genesis of Upper Cambrian-Lower Ordovician dolomites in the Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China: Several limitations from petrology, geochemistry, and fluid inclusions // *Marine and Petroleum Geology*. 2018. V. 91. P. 43–70. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2017.12.023
- Gao B., Tian F., Pan R. F., Zheng W. H., Li R., Huang T. J., Liu Y. S. Hydrothermal dolomite paleokarst reservoir development in wolonghe gasfield, Sichuan Basin, revealed by seismic characterization. // *Water*. 2020. V. 12. № 2. 579 p. DOI: 10.3390/w12020579
- Hardie L. A. Dolomitization: A critical view on some current views // *Journal of Sedimentary Petrology*. 1987. Vol. 57. P. 166–183.
- Land L. S. The origin of massive dolomite // *Journal of geological education*. 1985. Vol. 33. P. 112–125.
- Machel H. G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings-old and new insights // *Sedimentary Geology*. 2001. V. 140. P. 143–175. DOI: 10.1016/S0037-0738(00)00176-7
- Machel H. G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal. Geological Society Special Publications, 2004, vol. 235, pp. 7–63.
- Swart P. K. The geochemistry of carbonate diagenesis: The past, present and future // *Sedimentology*. 2015. Vol. 62. P. 1233–1304. DOI: 10.1111/sed.12205
- Warren J. Saline dolomites: Ancient — part 4 of 4 — saddle dolomite, calcite and anhydrite spar burial salts. *Salty matters*. 2019. P. 1–22. URL: <http://www.saltworkconsultants.com/blog-salty-matters>
- Whitaker F. F., Smart P. L., Jones G. D. Dolomitization: from conceptual to numerical models // *Special Publication of the Geological Society*. 2004. Vol. 235. P. 99–139. DOI: 10.1144/GSL.SP.2004.235.01.05
- Whitaker F. F., Xiao Y. Reactive transport modeling of early burial dolomitization of carbonate platforms by geothermal convection // *AAPG Bulletin*. 2010. Vol. 94. P. 889–917.

Поступила в редакцию / Received 05.06.2024