

УДК 550.849

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-2-79-92

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ КАК ИНДИКАТОРЫ СТЕПЕНИ ПРЕОБРАЗОВАННОСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ ЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЕМ-ЕГОВСКОЙ ВЕРШИНЫ (КРАСНОЛЕНИНСКИЙ СВОД, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Маргарита Рубеновна Латыпова¹✉, Всеволод Юрьевич Прокофьев²,
Наталья Сергеевна Балущкина³, Юлия Александровна Коточкова⁴,
Валерия Вадимовна Чуркина⁵, Дарья Андреевна Иванова⁶, Мария Леонидовна
Махнутина⁷, Антон Георгиевич Калмыков⁸, Георгий Александрович Калмыков⁹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; margarita.r.latypova@gmail.com[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8258-9012>

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН), Москва, Россия; vpr@igem.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7134-2655>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nataliabalushkina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5900-204>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kotjulik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5004-4832>

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lera.keily@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7466-1598>

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; d.ivanova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1225-4919>

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.mahnutina@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3546-1512>

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; a.kalmykov@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8862-8227>

⁹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; g.kalmykov@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8274-3622>

Аннотация. Изучены флюидные включения в кристаллах кварца из карбонатных пород абалакской свиты 5 скважин Ем-Еговской вершины Красноленинского свода (Западная Сибирь). Обнаружены двухфазовые флюидные включения (ФВ) с водно-солевыми растворами, включения, содержащие органическую жидкость, и однофазовые газовые флюидные включения. Для флюидных включений с несколькими фазами получены значения температуры гомогенизации. Для однофазовых включений выявлена температура появления второй фазы. Установлено, что в одной скважине присутствуют два вида первичных включений, с нефтью и с водно-солевым раствором. Температуры гомогенизации первичного флюидного включения, содержащего водно-солевой раствор, составляет 267 °С, гомогенизация содержащего нефть включения превышает 300 °С. В первично-вторичных включениях температура гомогенизации достигала 136 °С. Исследования состава включений методом инфракрасной спектроскопии показали, что в однофазовых включениях газ представлен метаном. В первично-вторичных включениях состав может различаться, при этом в газовой фазе преобладающими компонентами могут являться углеводороды с двумя или более атомами углерода. Исследования органического вещества из перекрывающих абалакскую свиту отложений тутлеймской нефтегазоматеринской свиты показали, что стадия катагенетической преобразованности керогена в изучаемых скважинах изменяется. Установлено, что в скважинах, в которых органическое вещество наиболее преобразовано, температура гомогенизации флюидных включений превышает 130 °С. Таким образом, доказано, что на территории Ем-Еговской вершины Красноленинского свода имела место проработка юрских отложений тепловыми потоками, создаваемыми высокотемпературными флюидами. Термальной проработке подвергались не только породы абалакской свиты, но и органическое вещество из тутлеймской свиты, в результате чего увеличивалась его зрелость и стимулировалась генерация углеводородных соединений. Полученные результаты позволили объяснить различия в катагенетической преобразованности органического вещества тутлеймской свиты на данной территории. Определение молекулярного состава включений позволит более точно восстановить условия протекания гидротермальных процессов. Изучение флюидных включений может дать возможность разработать новые критерии поиска месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: флюидные включения; температура гомогенизации; абалакская свита; тутлеймская свита; гидротермальные процессы; термическая преобразованность органического вещества; юрская высокоуглеродистая формация; Западная Сибирь; Красноленинский свод

Для цитирования: Латыпова М.Р., Прокофьев В.Ю., Балущкина Н.С., Коточкова Ю.А., Чуркина В.В., Иванова Д.А., Махнутина М.Л., Калмыков А.Г., Калмыков Г.А. Геохимические характеристики флюидных включений как индикаторы степени преобразованности органического вещества из юрских отложений Ем-Еговской вершины (Красноленинский свод, Западная Сибирь) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 2. С. 79–92.

FLUID INCLUSIONS GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AS INDICATORS OF THE ORGANIC MATTER TRANSFORMATION DEGREE IN JURASSIC SEDIMENTS OF THE EM-EGA CREST (KRASNOLENINSKY ARCH, WESTERN SIBERIA)

Margarita R. Latypova¹, Vsevolod Yu. Prokofiev², Natalia S. Balushkina³,
Julia A. Kotochkova⁴, Valeria V. Churkina⁵, Daria A. Ivanova⁶,
Maria L. Makhnutina⁷, Anton G. Kalmykov⁸, Georgy A. Kalmykov⁹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; margarita.r.latypova@gmail.com ✉,
<https://orcid.org/0000-0001-8258-9012>

² Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences), Moscow, Russia; vpr@igem.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7134-2655>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nataliabalushkina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5900-2044>

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kotjulik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5004-4832>

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lera.keily@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7466-1598>

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; d.ivanova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1225-4919>

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; m.mahnutina@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3546-1512>

⁸ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; a.kalmykov@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8862-8227>

⁹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; g.kalmykov@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8274-3622>

Abstract. Fluid inclusions in quartz crystals from the Abalak formation carbonate rocks of 5 wells on the Em-Egovskaya summit of the Krasnoleninsky arch (Western Siberia) were investigated. Two-phase fluid inclusions with water-salt solutions, inclusions containing organic liquid, and single-phase gas fluid inclusions were found. For fluid inclusions with two-phases, the values of the homogenization temperature were obtained. For single-phase inclusions, the temperature of the second phase forming was revealed. It was established that two types of primary inclusions are present in one well, with oil and with water-salt solution. The homogenization temperature of the primary fluid inclusion containing a water-salt solution is 267 °C, the homogenization of the oil-containing inclusion exceeds 300 °C. In primary-secondary inclusions, the homogenization temperature reached 136 °C. Studies of the composition of inclusions by infrared spectrometry have shown that in single-phase inclusions, the gas is represented by methane. In primary-secondary inclusions, the composition may vary, while in the gas phase, the predominant components may be hydrocarbons with two or more carbon atoms. Studies of organic matter from the deposits of the Tutleim source-rock formation overlying the Abalak formation have shown that the stage of catagenetic transformation of kerogen in the studied wells changes. It was found that in wells in which organic matter is most transformed, the homogenization temperature of fluid inclusions exceeds 130 °C. Thus, it is proved that on the territory of the Em-Egovskaya summit of the Krasnoleninsky arch, Jurassic deposits were effected by heat flows created by high-temperature fluids. Not only rocks of the Abalak formation were exposed by thermal processes, but also organic matter from the Tutleim formation was changed, as a result its maturity increased and the generation of hydrocarbon compounds was stimulated. The results obtained explain the difference in the catagenetic transformation of the organic matter of the Tutleim formation in this area. The study of the molecular composition of inclusions will allow us to more accurately reconstruct the conditions of hydrothermal processes. The study of fluid inclusions makes it possible to develop new criteria for the search for oil and gas deposits.

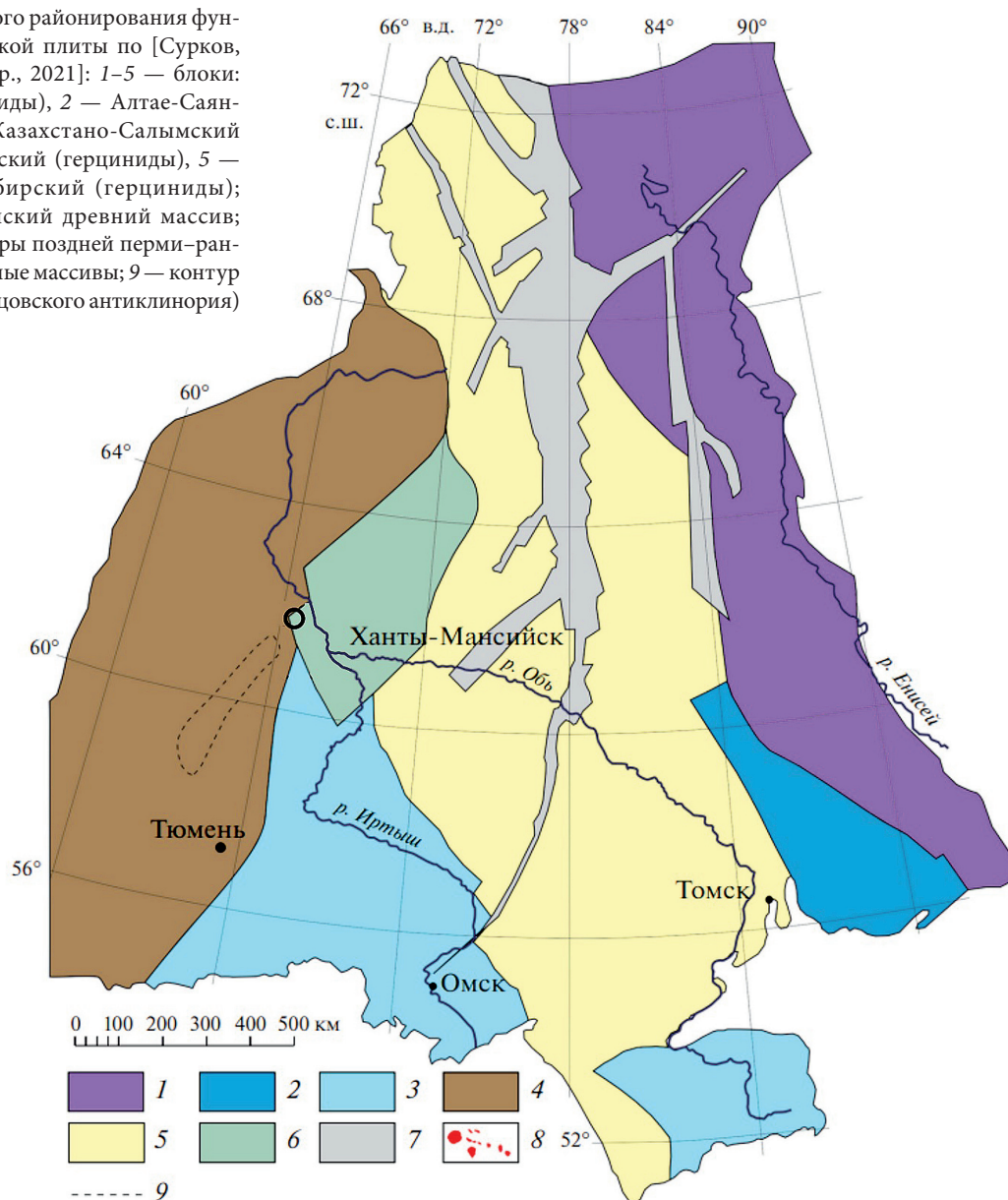
Keywords: Fluid inclusions; homogenization temperature; Abalak formation; Tutleim formation; hydrothermal processes; thermal transformation of organic matter; Jurassic high-carbon formation; Western Siberia; Krasnoleninsky arch

For citation: Latypova M.R., Prokofiev V.Yu., Balushkina N.S., Kotochkova Ju.A., Churkina V.V., Ivanova D.A., Makhnutina M.L., Kalmykov A.G., Kalmykov G.A. Fluid inclusions geochemical characteristics as indicators of the organic matter transformation degree in Jurassic sediments of the Em-Ega crest (Krasnoleninsky arch, Western Siberia). *Moscow University Geol. Bull.* 2023: 2; 79–92. (In Russ.).

Введение. В современной нефтегазовой геологии одно из актуальных направлений исследования — изучение вторичных процессов, протекающих в нефтегазоматеринских отложениях, и их влияния на преобразование органического вещества (ОВ). Одной из основных нефтегазоматеринских толщ является баженовская высокоуглеродистая формация (БВУФ), распространенная на территории Западной Сибири [Балушкина и др., 2015]. Классическая теория регионального катагенетического преобразования в осадочных толщах подразумевает изменение отложений под воздействием давления и

температуры вследствие погружения их на большую глубину при участии поровых растворов [Страхов, 1960]. На основании этой теории нефтегазоматеринские породы на большей глубине при одних и тех же условиях должны содержать в себе более преобразованное ОВ. Однако в некоторых случаях, в относительно неглубоко погруженных толщах, степень катагенетической преобразованности ОВ выше, чем в более погруженных частях бассейна [Калмыков и др., 2019]. Эти катагенетические аномалии, можно объяснить воздействием на осадочный разрез высокотемпературных флюидов — низкотем-

Рис. 1. Схема тектонического районирования фундамента Западно-Сибирской плиты по [Сурков, Жеро, 1981; Хотылев и др., 2021]: 1–5 — блоки: 1 — Енисейский (байкалиды), 2 — Алтае-Саянский (салаириды), 3 — Казахстано-Салымский (каледониды), 4 — Уральский (герциниды), 5 — Центрально-Западносибирский (герциниды); 6 — Уват-Хантыманский древний массив; 7 — рифтогенные структуры поздней перми–раннего траса; 8 — гранитоидные массивы; 9 — контур Шаимского (Шаимо-Кузнецовского антиклинория)



пературных гидротермальных растворов [Ферсман, 1922]. При активном влиянии последних происходит «локальная» проработка осадочных толщ с преобразованием ОВ, которое, в свою очередь, генерирует углеводородные соединения.

Кроме преобразования ОВ, в результате локального воздействия на породы может формироваться жильный кальцит в карбонатных пластах, которые иногда присутствуют в подошве БВУФ. Различные следы вторичных преобразований, такие как образование вторичной пористости, альбитизация плагиоклазов, карбонатизация, окремнение, вторичное окварцевание и выщелачивание радиоляритов ранее были описаны в отложениях БВУФ [Немова и др., 2010]. Такие преобразования могут приводить к образованию вторичных коллекторов в нефтематеринских породах [Калмыков и др., 2019; Карпов и др., 2019]. Таким образом, роль локального катагенеза при изучении отложений БВУФ Западной Сибири очень значима и влияет не только на преобразование

ОВ, но и на фильтрационно-емкостные свойства нетрадиционных коллекторов.

Ранее следы вторичных гидротермальных процессов были описаны в юрских породах Западной Сибири [Карпова и др., 2021; Латыпова и др., 2019]. В результате низкотемпературной гидротермальной проработки часто образуется вторичная минерализация, а в новообразованных кристаллах кварца, кальцита и доломита иногда сохраняются флюидные включения (ФВ) водно-углеводородного гидротермального флюида [Реддер, 1987]. Температура гомогенизации двухфазовых водно-солевых ФВ — достаточно надежный геотермометр, который позволяет выявлять температуру их разделения на фазы в пласте [Burruss, 1987]. Если подобное двухфазовое ФВ было захвачено при росте кристалла (первичное), то температура его гомогенизации показывает минимальную температуру его образования. В то же время минимальная температура не характеризует фактическую температуру прогрева пород.

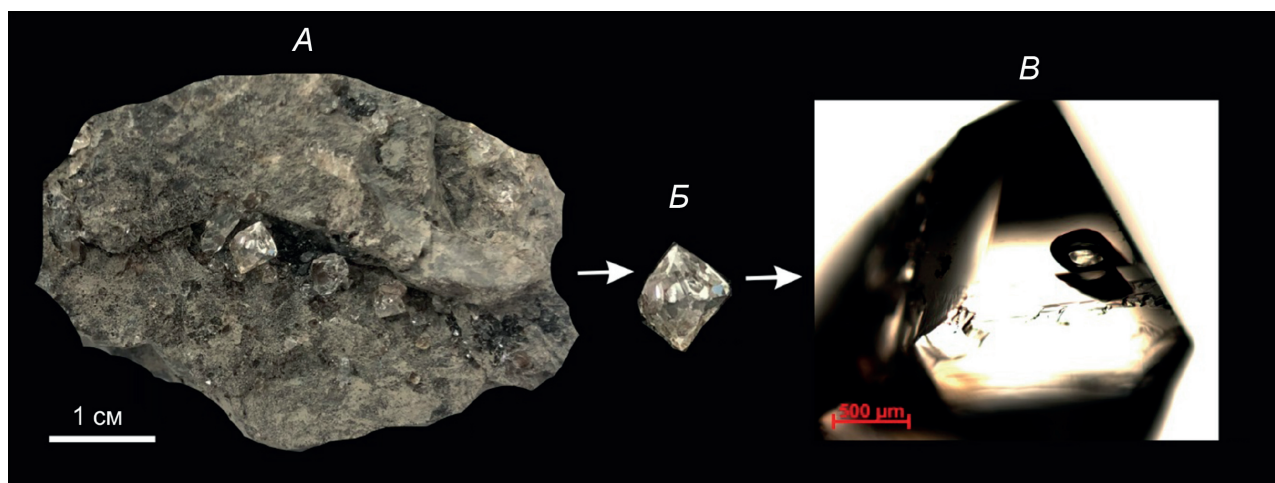


Рис. 2. Фотография образца карбонатной породы, содержащего кристалл кварца (А), фотография выделенного кристалла кварца (Б), В — фотография под микроскопом ФВ внутри кристалла кварца

Для более полного восстановления параметров протекания гидротермальных процессов необходимо установить молекулярный и изотопный состав ФВ. Одним из методов определения состав является ИК-спектметрия, позволяющая идентифицировать соединения, не разрушая ФВ. Состав включений может указывать на источник нефти или определять дальность миграции УВС [Li et al., 2001; Li, Chen, 2008; Guilhaumou et al., 1989]. Стоит отметить, что определять характеристики образования ФВ можно также экспериментальными методами. Эксперименты по выращиванию кристаллов кварца с ФВ в присутствии нефти, как источника флюида, показало, что при повышенной температуре 260–300 °С в составе включений захватывается больше легких соединений, а также появляется метан, который может образовываться в результате вторичного крекинга нефти [Балицкий и др., 2007, 2011]. Таким образом, получается, что состав позволяет косвенно предполагать в том числе и о температурах формирования ФВ.

На территории Ем-Еговской вершины (Западная Сибирь, Красноленинский свод) в кристаллах кварца, выросшего внутри жил в карбонатных породах абалакской свиты (J_2k — J_3v^1) были обнаружены ФВ. Целью работы являлось определение геохимических характеристик ФВ для восстановления условий протекания гидротермальных процессов в верхнеюрских отложениях и оценки их влияния на степень преобразования ОВ нефтегазоматеринских пород БВУФ.

Материалы и методы исследований. Изучаемая территория находится в пределах Уват-Ханты-Мансийского древнего массива Западно-Сибирской плиты (рис. 1). В рамках работы исследовано 95 м керна из абалакской и тутлеймской свит из 5 скважин (А-Е)

с территории Ем-Еговской вершины Красноленинского свода.

Петрографические описания проводились по тонким (20 мкм) шлифам, изготовленным по методике Недоливко и Ежовой [Недоливко и др., 2012].

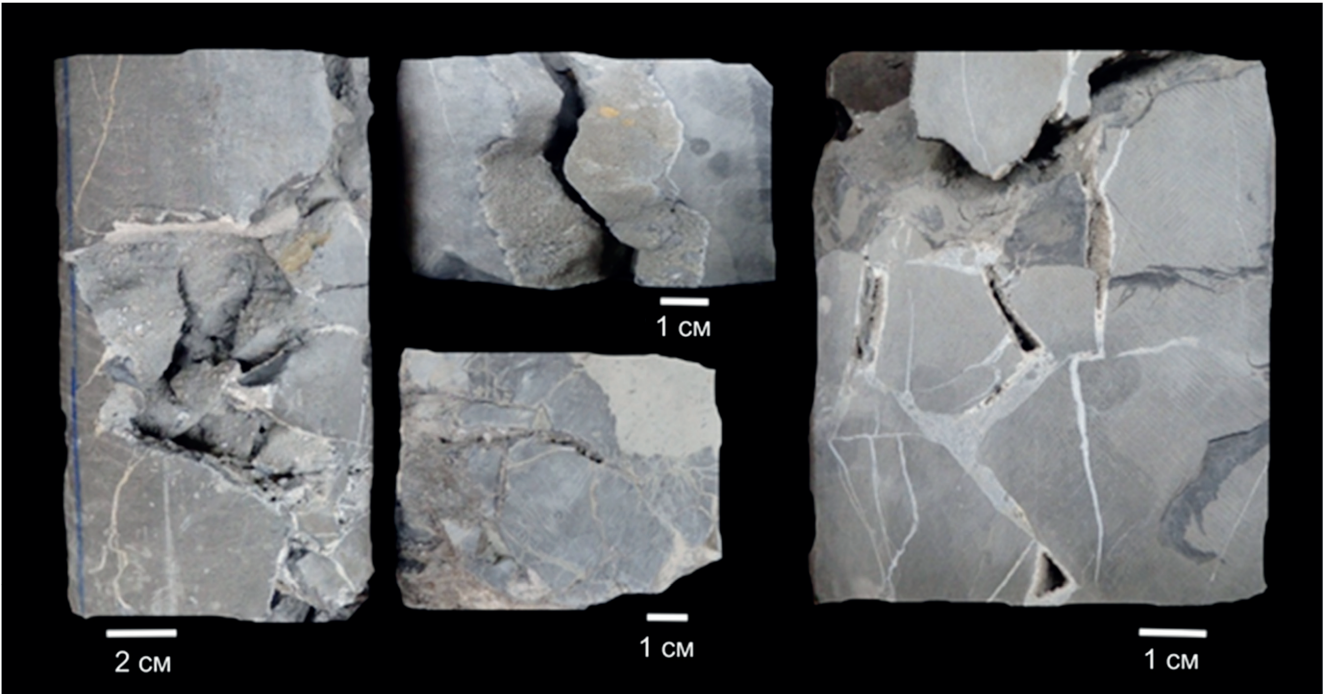
Фотографии петрографических шлифов были сделаны с использованием микроскопа Olympus BX53P, приобретенного по программе развития МГУ.

Подготовка кристаллов кварца для определения наличия в них ФВ осуществлялась путем растворения трещиноватых карбонатных пород (рис. 2, А) в HCl до появления нерастворимого осадка. Затем осадок высушивали и отбирали кристаллы кварца (рис 2, Б). На следующем этапе кристаллы размером >1 мм подвергали осмотру под биноклем для выявления наличия в них ФВ (рис. 2, В). Всего для исследования ФВ было отобрано 7 образцов (по одному образцу из скважин А, В и Д и по 2 образца из скважин С и Е). В отобранных кристаллах кварца всего исследовано 58 ФВ.

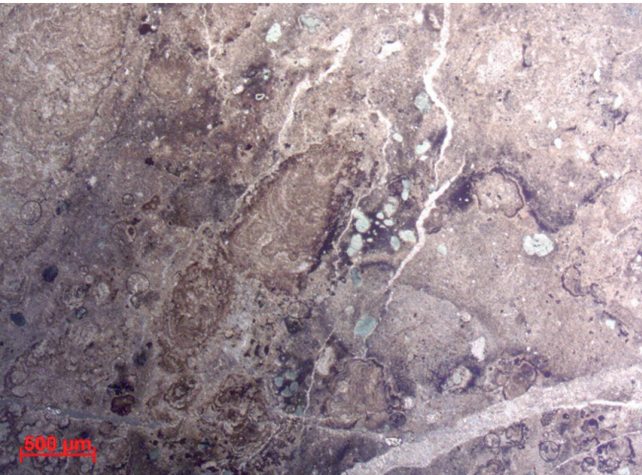
Исследование ФВ в кристаллах кварца из карбонатных пород абалакской свиты выполнено в лаборатории геохимии ИГЕМ РАН при помощи измерительного комплекса, созданного на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы «Linkam» (Великобритания), микроскопа Olympus BX51, видеокамеры и управляющего компьютера. Применение оптического микроскопа Olympus BX51 позволило обнаружить и исследовать ФВ размером 8–15 мкм. Измерительный комплекс дает возможность в режиме реального времени измерять температуру фазовых переходов во включениях в интервале от –196 до 600 °С, наблюдать за ними при больших увеличениях и получать цифровые микрофотографии. Стоит отметить, что в случае перехода жидкой фазы в газообразную включения ФВ могут разрушаться,

Рис. 3. Фотографии карбонатных фрагментов керна абалакской свиты с кавернами и трещинами, частично заполненными кальцитом и кварцем (А). Фотографии шлифов микробинальных карбонатов абалакской свиты при увеличении 2,5х при параллельных (Б) и скрещенных (В) николях; фотографии шлифов из вторичных карбонатов абалакской свиты при увеличении 2,5х при параллельных (Г) и скрещенных (Д) николях

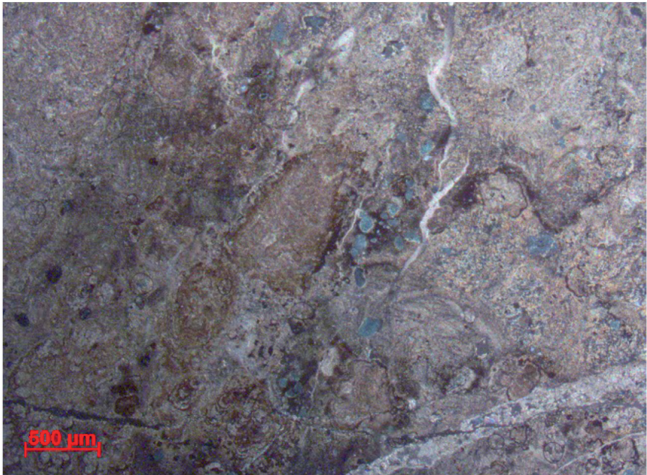
А



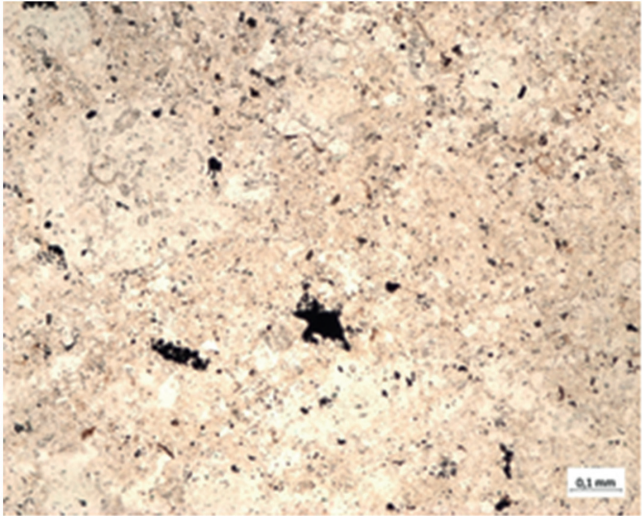
Б



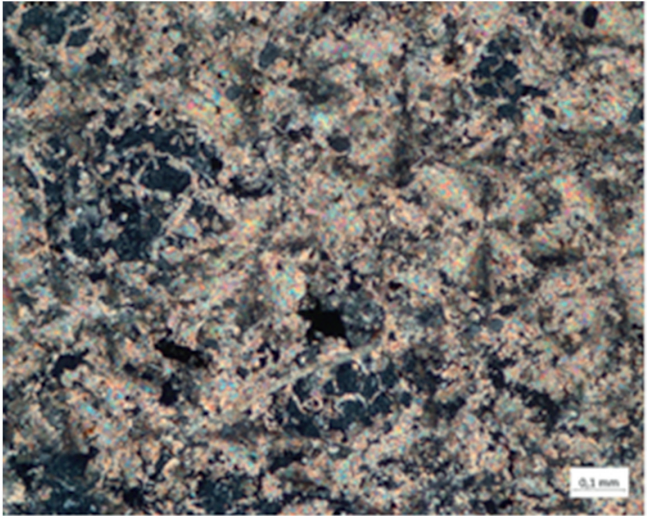
В



Г



Д



в результате чего установить температуру полного фазового перехода не представляется возможным. Концентрацию солей растворов ФВ рассчитывали по температуре растворения кристалла льда с использованием данных для системы $\text{NaCl-H}_2\text{O}$. Солевой состав растворов определяли по значениям температуры эвтектики [Борисенко, 1977]. Концентрацию солей и плотности водного флюида оценивали с использованием программы FLINCOR [Brown, 1989]. Для ФВ, содержащих органические жидкости, определяли температуру гомогенизации в газовую фазу. Оценены плотность и давление метана. Для включений, содержащих органические соединения с длиной цепи от двух атомов углерода и более снимали ИК-спектр в диапазоне от 4000 до 2050 см^{-1} на ИК-микроскопе LIMOS II с матричным детектором 32×32 пикселя (в ИГЕМ РАН).

Для определения степени преобразованности ОВ из нижней части тутлеймской свиты были проведены пиролитические исследования 31 образца из 5 скважин. Перед проведением исследований из образцов были удалены остаточные углеводородные соединения, влияющие на результаты пиролиза. Для этого была выполнена горячая экстракция в аппарате Сокслета. Экстракция заканчивалась при достижении концентрации битумоидов в аппарате Сокслета менее 0,000625%. Пиролитические исследования на образцах до и после экстракции по методике Rock-Eval [Espitalie, 1993; Behar et al., 2001] производили на приборе HAWK Wildcat Technologies.

Результаты исследований и их обсуждение.

По результатам литологического описания керна выявлено, что верхняя часть разреза, представляющая нижнюю часть тутлеймской свиты, сложена как правило, керогеново-кремнево-глинистыми и керогеново-глинисто-кремневыми породами. В основной глинисто-кремневой массе коричневатого-серого и темно-серого цвета часто присутствуют обломочные зерна кварца алевритовой размерности и органическое вещество, неравномерно распространенное в породе, стянутое в линзы и тонкие пленки шириной 0,01–0,025 мм.

Отложения абалакской свиты, которые находятся в нижней части исследуемого разреза, сложены глинистым, глауконито-глинистыми, редко алевритово-глинистыми разностями с многочисленными прослоями карбонатных пород, пересеченными сетью разнонаправленных трещин (рис. 3, А). Эти карбонатные породы представляют собой прослои, мощностью до 2 м. Прослои, как правило, неравномерно деформированы многочисленными трещинами, а вмещающие трещины породы растворялись с образованием каверн. На стенках трещин и каверн кристаллизовались кальцит, доломит и кварц, образуя жилы. Размеры кристаллов кварца варьируют от 0,2 до 5 мм. Литологическое описание петрографических шлифов показало, что исследуемые трещиноватые и кавернозные карбонатные породы абалакской свиты преимущественно представлены

микробиальными карбонатами с многочисленными строматолитовыми текстурами, зернами глауконита и вторичными, вероятно диагенетическими, трещинами, заполненными кальцитом и доломитом (рис. 3, Б, В).

В редких образцах строматолитовые текстуры отсутствуют. При этом выявлены многочисленные кристаллические и сфероагрегатные структуры. Исходную природу этих вторичных известняков установить затруднительно из-за отсутствия в них первичных текстур (рис. 3, Г, Д). Вероятно, их образование происходило в результате вторичной перекристаллизации первичного микрита, либо при изменениях в диагенезе [Фролов, 1993].

На основании литологического описания кернового материала и петрографических шлифов были построены литологические колонки исследуемых интервалов для 5 скважин (рис. 4). На рисунке указано положение карбонатных пород абалакской свиты, в которых были обнаружены жилы, заполненные кристаллами кварца с ФВ. В скважинах А и В трещины с кристаллами кварца находятся внутри вторичных карбонатов, в скважинах С и Д — внутри микробиальных карбонатов, а в случае скважины Е они находятся внутри глинистой и глинисто-кремневой породы на границе абалакской и тутлеймской свит.

Исследования водных вытяжек жильного кварца Приполярного Урала показали, что образование горного хрусталя с ФВ протекает при температурах 90–350 °С и давлении 100–350 атмосфер [Кораго и др., 1988]. Растворы, принимавшие участие в минералообразовании, богаты ионами хлора, натрия, калия, кальция, а процесс минералообразования имеет пульсирующий характер и сопровождался тектоническими подвижками. По данным А.В. Козлова (1998), в процессе минералообразования и после него принимали участие газы корового и мантийного происхождения.

ФВ в образцах абалакской свиты относятся к первичным (П), образовавшимся в процессе роста кристаллов, и первично-вторичным (П-В), образующимся при последующей перекристаллизации кристаллов кварца. П-В ФВ могут образовываться в несколько этапов, в результате чего значения температуры гомогенизации фаз не будут характеризовать температуру первичного процесса. Все ФВ расположены вдоль залеченных трещин в объеме кристаллов. Первичная природа ФВ определена по их равномерному распределению в объеме минерала-хозяина [Реддер, 1987].

Все ФВ под микроскопом можно разделить на 3 типа. К первому относятся двухфазовые газожидкие ФВ, в которых газовая фаза представлена углеводородами, занимающими менее 10% объема вакуоли, и а жидкая — водным раствором минеральных солей (рис. 5). Тип 2 также представлен двухфазовыми ФВ, но жидкая фаза состоит из органических соединений. Газовая фаза в большинстве

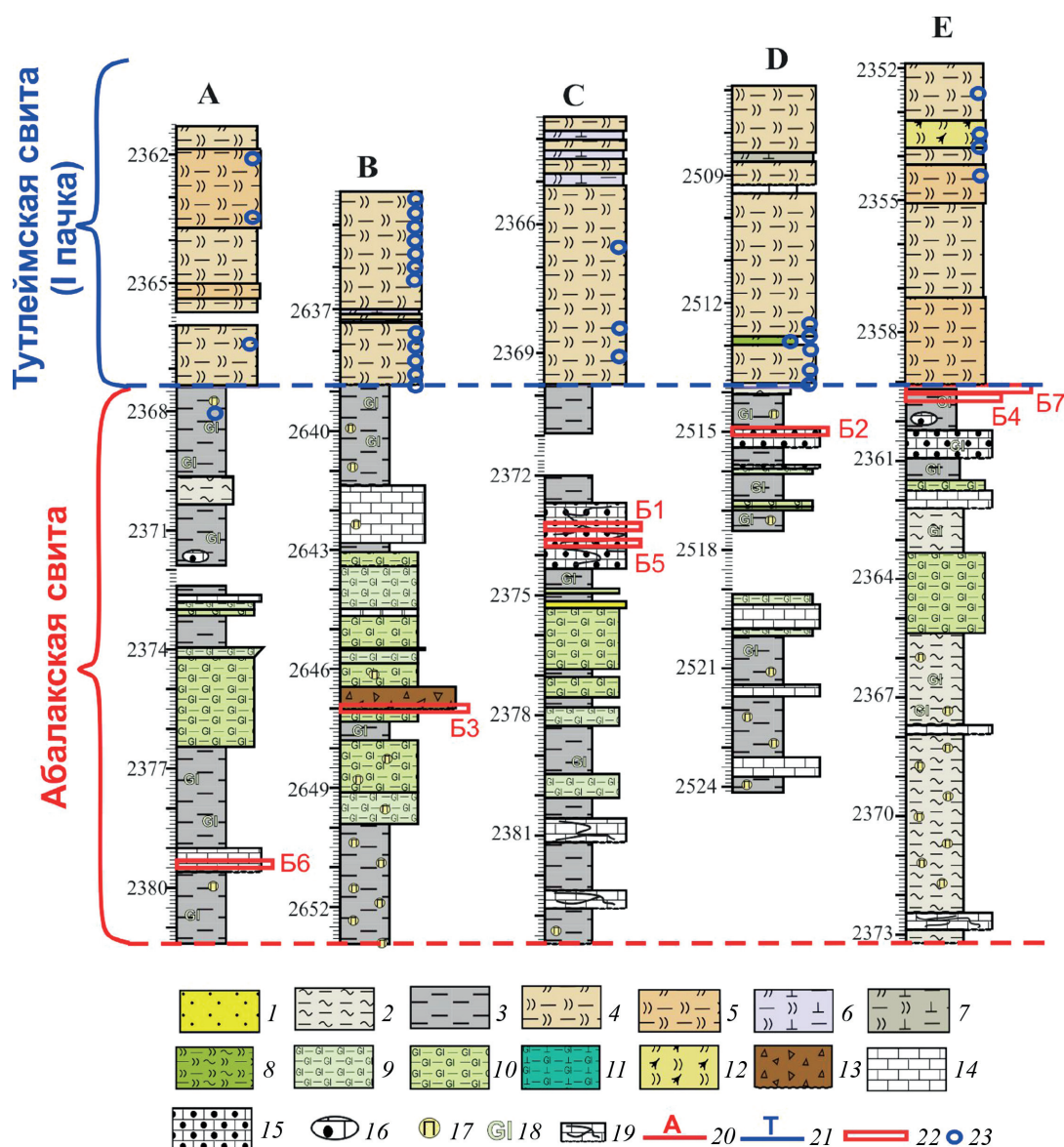


Рис. 4. Литологические колонки для исследуемых скважин (А–Е): породы: 1 — песчаники; 2 — алевро-глинистые; 3 — глинистые; 4 — кремнисто-глинистые; 5 — глинисто-кремневые; 6 — глинисто-кремнево-карбонатные; 7 — глинисто-карбонатно-кремневые; 8 — алевролитово-кремнево-глинистые; 9 — глауконитово-глинистые; 10 — глинисто-глауконитовые; 11 — глауконитово-карбонатно-глинистые; 12 — радиоларит; 13 — брекчированная карбонатная; 14 — известняк; 15 — бактериально-водорослевые карбонатные постройки; 16 — единичные микробные карбонаты, стянутые в диагенетические конкреции; 17 — стяжения пирита; 18 — глауконит; 19 — отложения абалакской свиты; 20 — отложения тутлейской свиты; 21 — образцы, отобранные на исследование флюидных включений; 22 — образцы, отобранные на пиролитические исследования ОВ

случаев занимает 70–80 об.% (рис. 6). Также встречено ФВ 2 типа, в котором окрашенная жидкость вероятнее всего представлена нефтью (рис. 7). 3 тип ФВ содержат только газовую фазу, состоящую из углеводородных соединений (рис. 8).

Определение температуры гомогенизации позволяет установить, при каких условиях происходит захват флюида в кристаллах. Важно отметить, что наиболее достоверными геотермометрами являются двухфазовые водно-солевые ФВ (1 П). Это связано с тем, что они образуются при росте, а не перекристаллизации кристаллов, а температура фазовых переходов определяется с большей точностью. Группа таких ФВ установлена только в образцах из скважины С. Температура гомогенизации включений составляет

267 °С, концентрация солей равна 2,0 масс.%-экв. NaCl, а плотность флюида — 0,78 г/см³ (таблица). Температура эвтектики раствора (–27 °С) свидетельствует о том, что в водном растворе соль преимущественно представлена хлоридом натрия.

Помимо скважины С ФВ 1 типа присутствуют только в скважине Е. Однако они относятся к первично-вторичным ФВ (1 П-В). Температура гомогенизации этих включений составила 115–136 °С, а температура эвтектики варьировала от –27 до –34 °С, что также свидетельствует о преобладании среди растворенных солей NaCl (таблица).

Первичные ФВ 2 типа (2 П), обнаружены в скважинах В, С и D. Температура их гомогенизации в газообразную фазу варьирует в диапазоне от +56

Результаты определения характеристик ФВ в кристаллах кварца в жилах карбонатных пород абалакской свиты

Скважина	Номер образца	Тип включений	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл.льда}}, ^\circ\text{C}$	$C_{\text{солей}}, \text{масс. \% /экв, NaCl}$	$d, \text{г/см}^3$
A	B6	2 П-В	77 Г	—**	—	—	—
B	B3	2 П	63 Г	—	—	—	—
		2 П	64 Г	—	—	—	—
C	B1	1 П	267	–27	–1,2	2,0	0,78
		2 П	68 Г	—	—	—	—
		2 П	71 Г	—	—	—	—
C	B5	2 П	100 Г	—	—	—	—
D	B2	2 П	56 Г	—	—	—	—
E	B4	1 П-В	115	–29	–3,9	6,2	0,99
		3 П-В	–87 Г*	—	—	—	0,14
	B7	1 П-В	136	–27	–1,4	2,3	0,95
		1 П-В	132	–34	–2,0	3,3	0,96
		3П-В	–71,7 Г*	—	—	—	0,09

Примечание: П — первичные включения, П-В — первично-вторичные включения. 1 — двухфазовые газово-жидкие водно-солевые ФВ, 2 — ФВ, содержащие органическую жидкость, 3 — однофазовые газовые ФВ; Г — гомогенизация в газ, без индекса (Г) — в жидкость, Г* — температура появления двух фаз в однофазовых, изначально гомогенных ФВ.

до +100 °С (табл. 1). Жидкость в этих включениях не замерзает при охлаждении до –150 °С.

Однофазовые первично-вторичные ФВ из скважины Е (3 П-В) при комнатной температуре изначально гомогенны. При охлаждении некоторые ФВ становились двухфазовыми, температура появления второй фазы составляет –71–87 °С (в таблице приведены значения в колонке $T_{\text{гом}}$ в ячейках с указанием Г*).

Кроме измерения температуры гомогенизации (для 1 и 2 типов включений) и температуры появления второй фазы (для 3 типа включений) проведены ИК-спектроскопические исследования флюидов из включений 2-го и 3-го типов. Было установлено, что углеводородные соединения в скважинах различаются по составу. При этом точно установить состав жидких углеводородов в двухфазовых включениях не удалось. ИК-спектры соединений из ФВ скважины Е и одного из скважины С показали, что преобладающим газообразным соединением является метан

(рис. 9). Это хорошо согласуется с определенной температурой образования жидкой фазы, составившей –87––71,7 °С. Близкую температуру кипения имеет метан (–82,7 °С). В скважине В в газовой фазе преобладают более длинноцепочечные соединений, предположительно, пропан. В остальных скважинах согласно данным ИК-спектрометрии присутствуют непредельные алканы, преимущественно алкены. Стоит отметить, что определение состава смеси соединений по данным ИК-спектрометрии сопряжено с наложением пиков соединений, поэтому необходимы дополнительные анализы, такие как разрушение кристаллов кварца под вакуумом с последующим хроматографическим анализом углеводородных соединений. Тем не менее, наличие непредельных соединений может свидетельствовать о более сложных процессах образования углеводородных соединений. Также отмечается, что в ФВ, имеющих наибольшую температуру гомогенизации, преобладающим газом является метан.

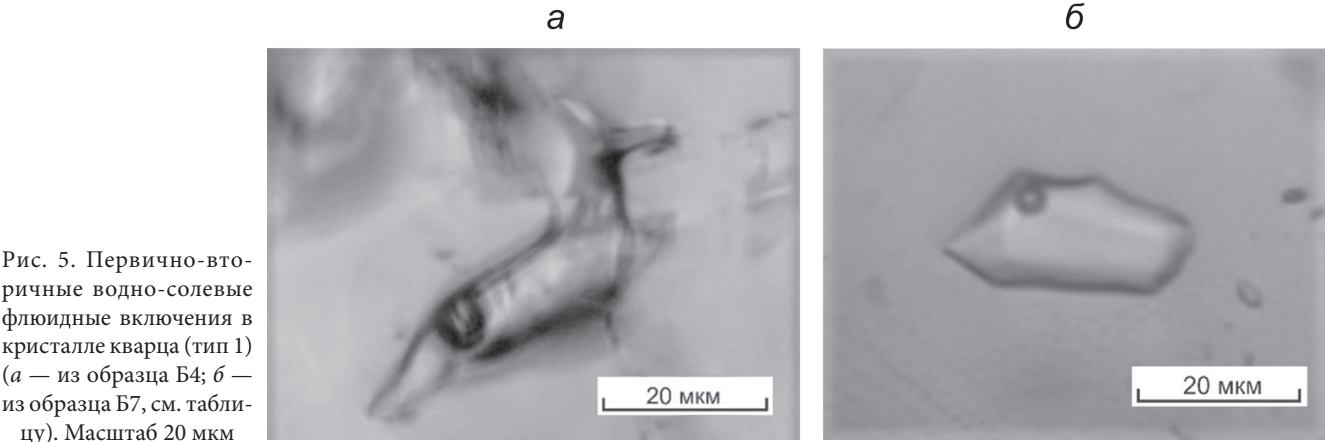


Рис. 5. Первично-вторичные водно-солевые флюидные включения в кристалле кварца (тип 1) (а — из образца Б4; б — из образца Б7, см. таблицу). Масштаб 20 мкм

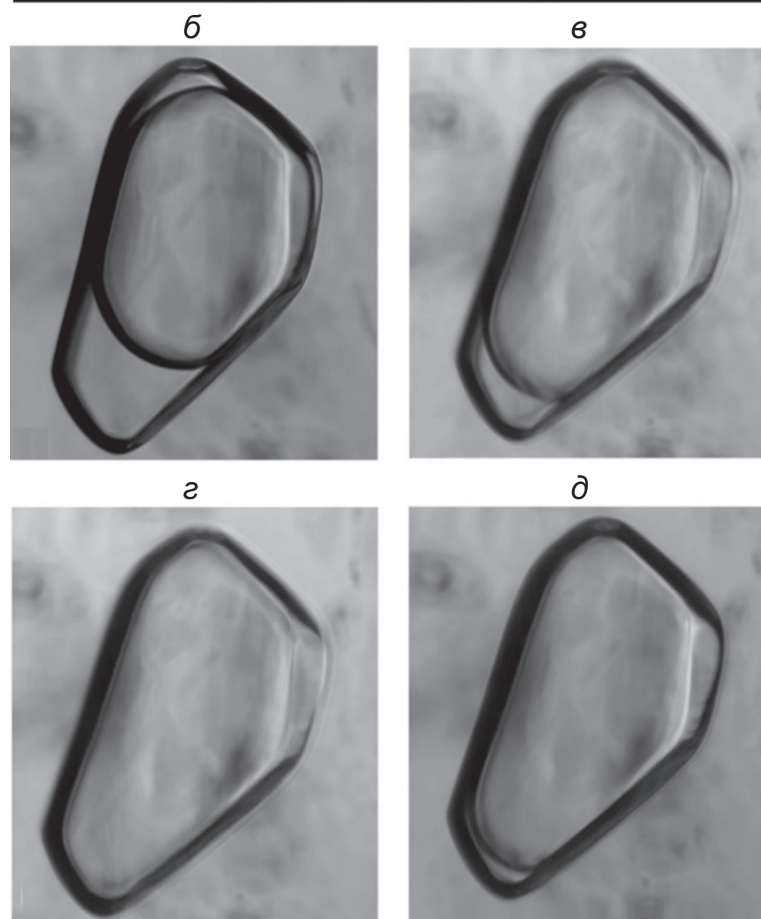
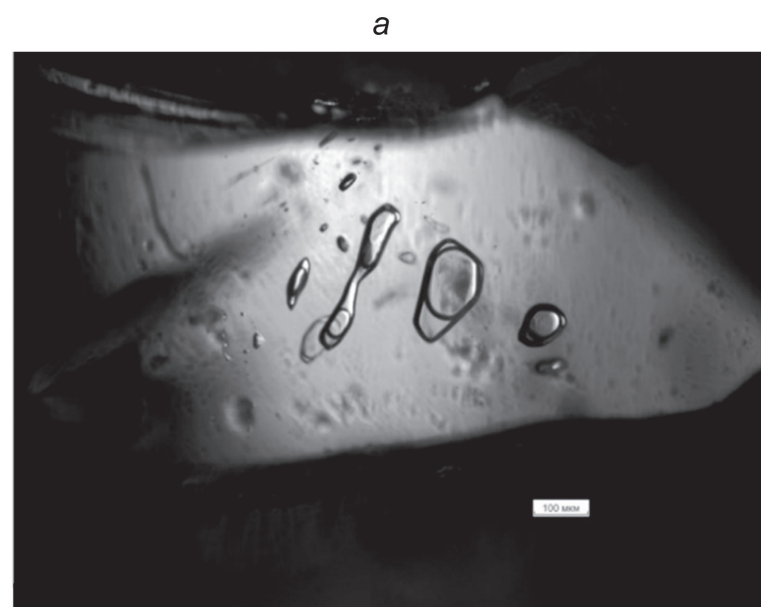


Рис. 6. Первичные газовые ФВ с органической жидкостью в кристалле кварца (тип 2) из образца Б1 (а — общий вид, б–д — микротермометрические исследования: б — при +25 °С, в — при +63 °С, г — при +73 °С, д — при +83 °С). Масштаб 100 мкм

Фактически, полученные результаты определения геохимических характеристик ФВ показывают, что температура формирования жил с кристаллами кварца могла различаться. В таком случае прогреваться могли не только сами породы абалакской свиты, но и вышележащие отложения тутлеймской

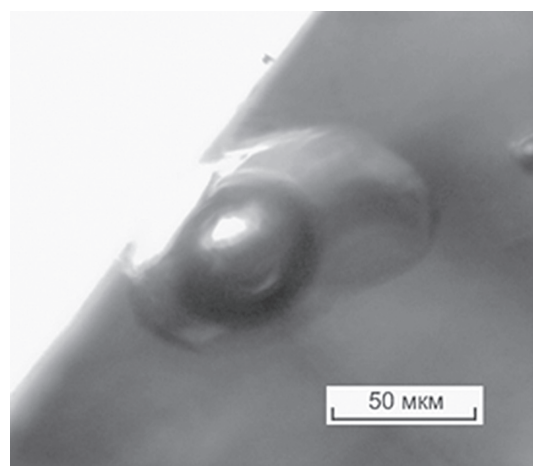


Рис. 7. Первичное ФВ с нефтью в кристалле кварца из образца Б5. Масштаб 50 мкм

свиты, относящейся к БВУФ. Для проверки данного предположения были выполнены исследования ОВ из пород нижней части тутлеймской свиты (рис. 4) методом пиролиза. Пиролитические исследования выполнялись после горячей экстракции, чтобы исключить влияние углеводородных соединений на получаемые результаты и установить степень преобразованности ОВ. Полученные результаты показали, что значения водородного индекса (НІ) в исследованных образцах изменяются в широких пределах 70–370 мг УВ/г ТОС, а температура максимального выхода углеводородов ($T_{\max}$) лежит в интервале от 436 до 448 °С (рис. 10). Результаты свидетельствуют, что кероген относится ко II (морскому) типу. Эти результаты ранее были подтверждены углепетраграфическими исследованиями [Марунова и др., 2021]. ОВ из исследуемых проб существенно преобразовано, достигло середины нефтяного окна или приближается к его концу в зависимости от скважины. При этом полученные результаты свидетельствуют, что ОВ преобразовано в разной степени: в скважинах Е и С его зрелость выше (НІ < 150 мг УВ/г ТОС), чем в скважинах А, В и D (НІ = 180–370 мг УВ/г ТОС). Согласно существующей классификации, стадия катагенеза варьирует от МК2 (скважина D) до МК4 (скважина Е) [Jarvie et al., 2001].

Для оценки степени преобразованности ОВ и возможности сопоставлять результаты между собой и с геохимическими характеристиками ФВ были рассчитаны средние значения НІ для ОВ их нижней части тутлеймской свиты в каждой скважине, после чего был определен индекс трансформации ОВ (transformation ratio — TR). Этот параметр рассчитывался по формуле:

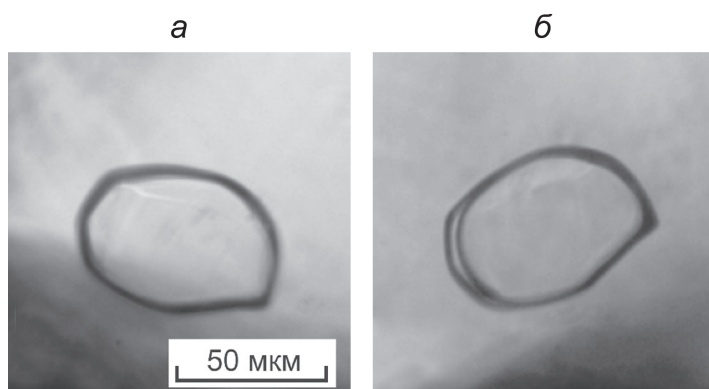


Рис. 8. Первичное газовое ФВ в кристалле кварца из образца Б-4 (3-й тип) (а — при +25 °С, б — при -113°С). Масштаб 50 мкм

$$TR = (HI_0 - HI_{\text{сред. после экстр.}}) / HI_0 \times 100\%,$$

где HI_0 — исходное значение водородного индекса до начала генерации углеводородных соединений, равное 715 мг УВ/г ТОС согласно проведенным ранее исследованиям [Калмыков и др., 2017], а HI — значение параметра после экстракции.

Рассчитанные значения индекса преобразованности показали, что в скважинах А и D близкая степень преобразованности, равная 58–62%. Скважина В несколько более преобразована, значение TR составляет 72%. В скважинах С и Е значение равно 82 и 85% соответственно.

Полученные результаты разной степени преобразованности ОВ в породах нижней части тутлеймской свиты хорошо коррелируют с различиями в геохимических характеристиках ФВ из кристаллов кварца в жилах карбонатных пород абалакской свиты. Так, только в скважинах с высокой степенью пре-

образованности (скважины С и Е) были обнаружены двухфазовые водно-солевые ФВ. Эти включения относятся к 1-му типу, судя по плотности флюида и концентрации солей, содержат в себе NaCl и не отличаются разнообразием состава. Температура гомогенизации для этих ФВ наиболее точно отражает температуру прогрева толщи гидротермальным флюидным потоком [Burruss, 1987]. Максимальная температура гомогенизации для первичного ФВ 1-го типа была зафиксирована в скважине С и составляет 267 °С. При этом в данной скважине также есть включение, содержащие окрашенную органическую жидкость, предположительно, нефть, а температура гомогенизации данного включения превышает 300 °С (точное значение определить не удалось из-за разрушения включения в результате флюидодинамического разрыва при исследовании). Процессы, при которых происходит повышение температуры

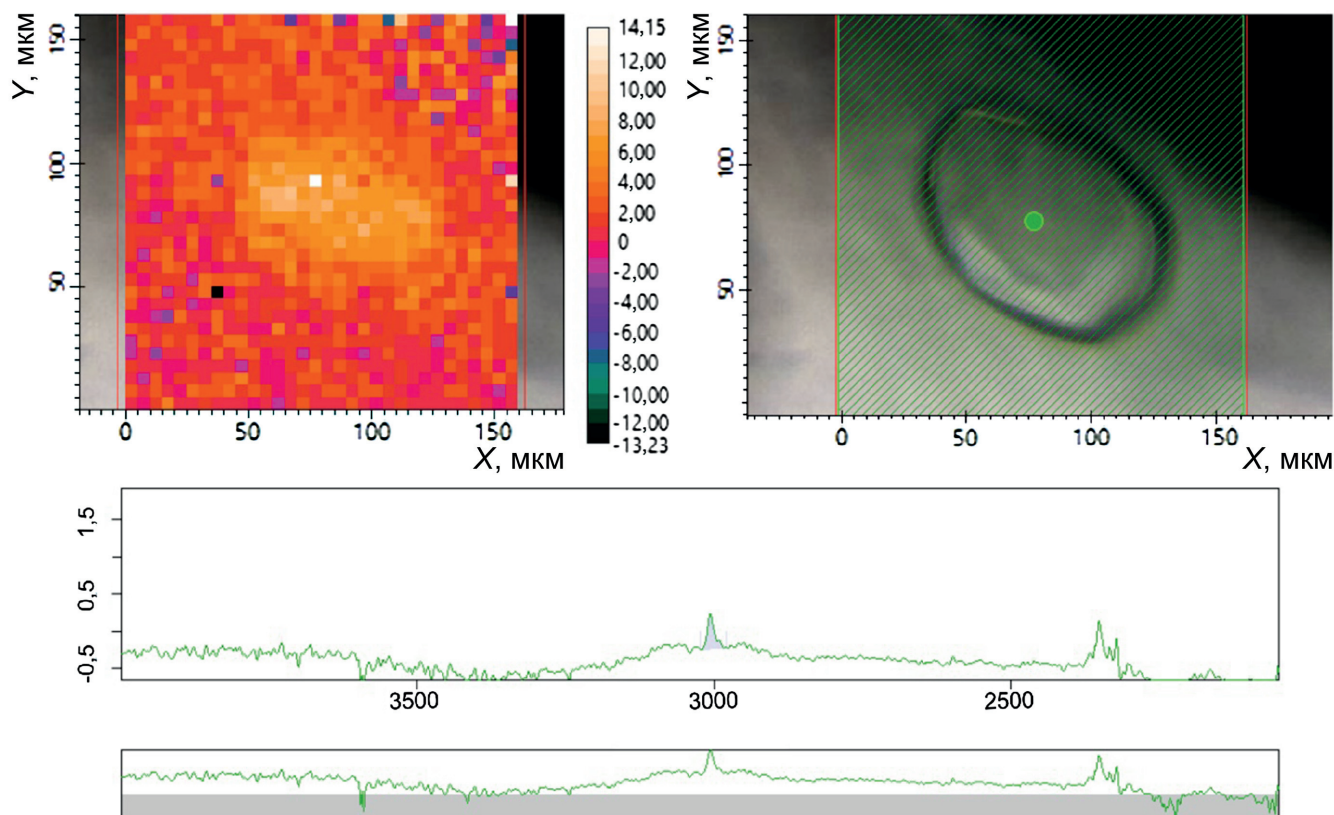
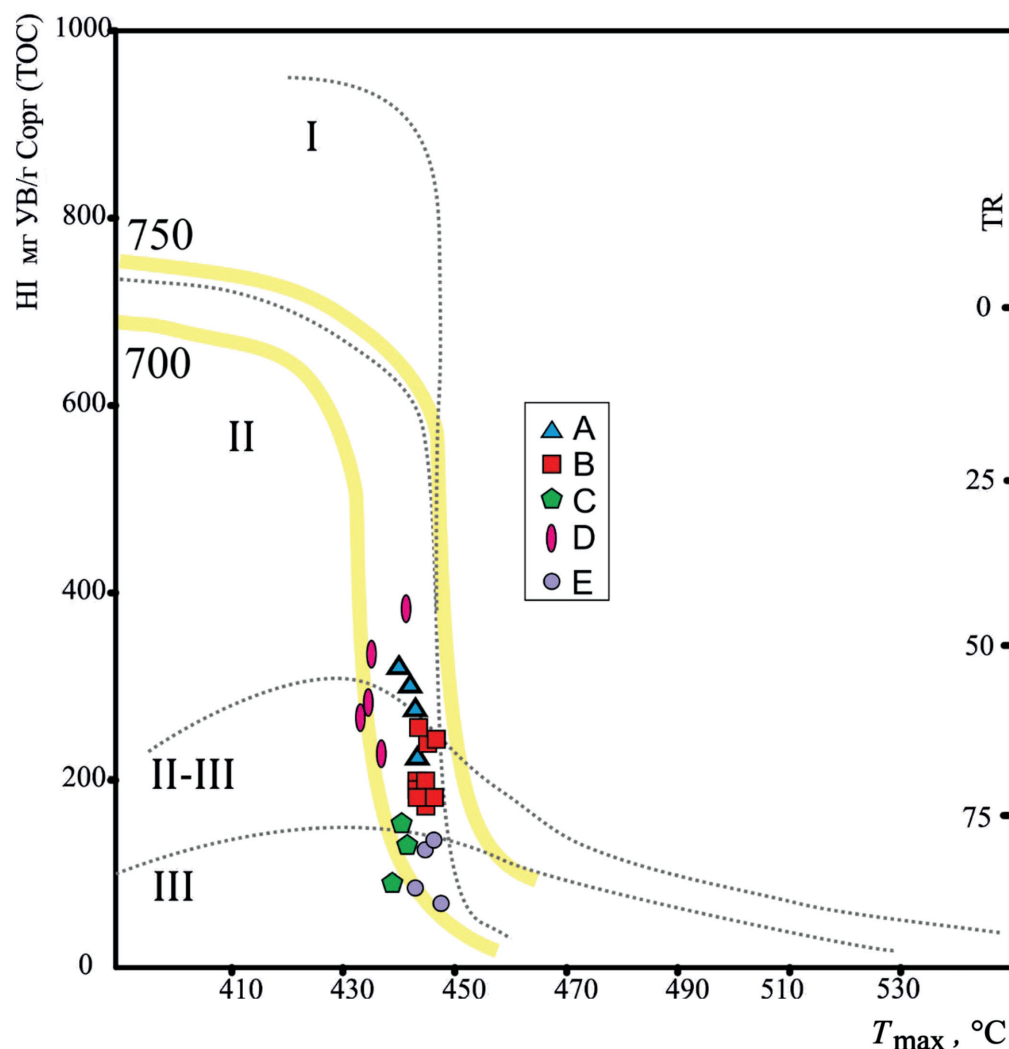


Рис. 9. Результаты ИК-микроскопических исследований газовых ФВ в кристалле кварце из образца Б4

Рис. 10. Модифицированная диаграмма Ван-Кревелена для исследуемых образцов после горячей экстракции: I–III — тип керогена, желтые линии — изменения параметров $T_{\max}$ и HI в процессе катагенетического преобразования керогена пород БВУФ по материалам [Козлова, 2015]



(200–300 °C), типичны для гидротермальных процессов [Прокофьев, 1998]. Таким образом, можно предполагать, что в скважинах С и Е при образовании кристаллов кварца в жилах карбонатных пород температура достигала высоких значений. Прогрев был достаточно интенсивным, в результате чего прогревалась нижняя часть отложений тутлеймской свиты, что выразилось в более высокой преобразованности ОВ.

Стоит также отметить, что только в скважине Е присутствуют ФВ 3-го типа, содержащие метан. Поскольку метан является простейшим по составу предельным углеводородом, можно предполагать, что повышенные температуры, воздействовавшие на органическое вещество нижележащих юрских отложений, приводили более полному протеканию процесса преобразования ОВ. Фактически, можно говорить о том, что геохимические характеристики ФВ в скважинах С и Е показали наличие гидротермальных процессов, протекавших при повышенных температурах, тогда как в скважинах А, В и D температуры были более низкими, а процесс образования кристаллов кварца с ФВ — многостадийным.

Полученные результаты позволили объяснить изменение стадии катагенетической преобразован-

ности ОВ в породах тутлеймской свиты на территории Ем-Егловской вершины. Было установлено, что все исследуемые скважины приурочены к структурному поднятию (рис. 11, А). Именно в районе этого поднятия на территории получены значения более высокой степени катагенетической преобразованности ОВ относительно более погруженных территорий (рис. 11, Б). Можно предполагать, что близость фундамента и наличие разломов могли обеспечивать прогрев зоны поднятия за счет тепловых потоков, в том числе связанных с гидротермальными процессами. При этом в локальном участке температура гидротермальной проработки была выше, что обеспечило локальный повышенный катагенез в зоне расположения скважин С и Е, подтвержденный пиролитическими исследованиями пород тутлеймской свиты еще в двух скважинах данной зоны, в которых керн из абалакской свиты отобран не был. Поскольку аналогичные зоны повышенной преобразованности встречаются как на территории Ем-Егловской вершины, так и на других территориях, можно говорить, что гидротермальные процессы являются причиной дополнительного прогрева пород, а изучение ФВ может способствовать определению условий их протекания и разработке поисковых кри-

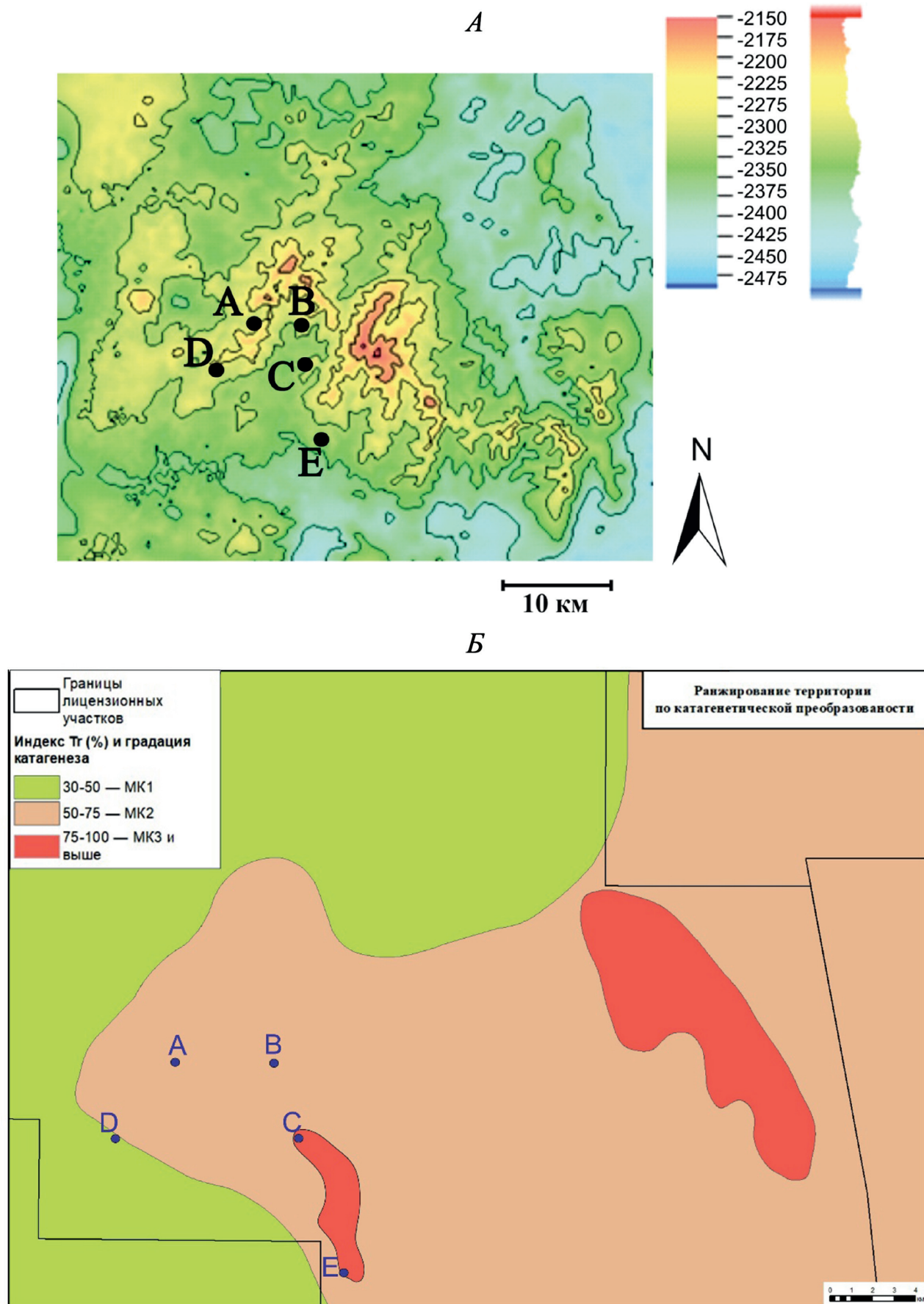


Рис. 11. Структурный план по кровле тутлейвской свиты с расположением исследуемых скважин (А) и схема катагенетической преобразованности ОВ на исследуемой территории по материалам авторов статьи (Б)

териев месторождений нефти и газа, образующихся в результате более интенсивной генерации углеводородных соединений в нефтегазоматеринских толщах.

Заключение. В результате проведенных работ в трещиноватых и кавернозных карбонатных породах абалакской свиты Ем-Еговской вершины обнаружены кристаллы кварца с ФВ трех типов: 1) двухфазные газово-жидкие водно-солевые ФВ; 2) ФВ, содержащие органическую жидкость; 3) однофазные газовые ФВ. Гомогенизация первичных двухфазовых водно-солевых ФВ позволила впервые установить минимальную температуру прогрева (267°C) отложений на Ем-Еговской вершине при образовании кристаллов кварца в результате гидротермальных процессов. При этом можно предполагать, что реальная температура прогрева превышала 300°C . На основании температуры эвтектики раствора (-27°C) установлено, что в гидротермальных растворах среды минеральных солей преобладает хлорид натрия.

По результатам пиролитических исследований определено, что ОВ из исследуемых отложений относится ко II типу. При этом катагенетическая преобразованность керогена варьирует от стадии середины нефтяного окна (МК2) до стадии конца нефтяного окна (МК4). Также установлено, что повышенный катагенез на исследуемой территории приурочен к зоне локального структурного поднятия.

Полученные данные подтверждают ранее высказанные предположения о влиянии гидротермальных процессов, проходящих в абалакской свите, на температурное преобразование ОВ из отложений тутлеймской свиты. Это также подтверждается полученной ранее зависимостью между соотношением стабильных изотопов кислорода в жильном кальците из карбонатных пород абалакской свиты со степенью преобразованности ОВ из отложений тутлеймской свиты [Латыпова и др., 2022]. Таким образом, полученная зависимость между TR и тем-

пературой гомогенизации, и составом флюидных включений в кристаллах кварца указывает на то, что проработка высокотемпературным флюидом, которая фиксируется в карбонатных породах абалакской свиты, часто затрагивает и вышезалегающие нефтегазоматеринские отложения тутлеймской свиты. Эти тренды между геотермометрами из отложений разных свит свидетельствуют о том, что положительные катагенетические аномалии, которые фиксируются по данным пиролиза в отложениях БВУФ, вероятно, отражают зоны вторичной проработки осадочного комплекса высокотемпературными флюидами.

Для того чтобы определить более точно температурные характеристики гидротермального флюида, установить его состав и природу, необходимо в дальнейшем отобрать флюиды из включений, определить молекулярный состав углеводородных соединений методами хроматографического анализа, установить минерализацию и состав солей в водных растворах и измерить изотопный состав водно-солевых растворов и органических соединений. Кроме того, детальное исследование микроэлементного и редкоземельного состава кварца, содержащего ФВ, вероятно, поможет установить природу проходивших высокотемпературных процессов. Полученную информацию о составе, температуре и природе гидротермальных процессов в отложениях баженовско-абалакского комплекса, можно использовать для восстановления процессов преобразования ОВ и построения карт катагенетических аномалий Западной Сибири, разработки критериев поиска зон повышенной генерации углеводородных соединений.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания МГУ имени М.В. Ломоносова АААА-А16-116033010113-2 «Оценка ресурсов трудноизвлекаемых углеводородов и разработка инновационных методов их освоения».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балицкий В.С., Пиронон Ж., Пентелей С.В. и др. Фазовые состояния водно-углеводородных флюидов при повышенных и высоких температурах и давлениях (по экспериментальным данным) // Докл. РАН. 2011. Т. 437, № 2. С. 224–227.

Балицкий В.С., Прокофьев В.Ю., Балицкая Л.В. и др. Экспериментальное изучение взаимодействия минералообразующих гидротермальных растворов и нефти и их совместной миграции // Петрология. 2007. Т. 15, № 3. С. 227–240.

Балушкина Н.С., Калмыков Г.А., Коробова Н.И., Шарданова Т.А. Структура пустотного пространства нефтенасыщенных пород баженовской и абалакской свит в центральной части Западно-Сибирского бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 69–77.

Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.

Калмыков А.Г., Бычков А.Ю., Калмыков Г.А. и др. Генерационный потенциал керогена баженовской свиты

и возможность его реализации // Георесурсы. 2017. Спецвып. Ч. 2. С. 165–172. DOI: <http://doi.org/10.18599/grs.19.17>.

Калмыков А.Г., Карнов Ю.А., Топчий М.С. и др. Влияние катагенетической зрелости на формирование коллекторов с органической пористостью в баженовской свите и особенности их распространения // Георесурсы. 2019. № 2. С. 159–171.

Карнов Ю.А., Балушкина Н.С., Ступакова А.В. и др. Критерии распространения нефтепродуктивных пород баженовской высокоуглеродистой формации с развитой системой поровой емкости в керогене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 2. С. 58–71.

Карнова Е.В., Хотылев А.О., Мануилова Е.А. и др. Гидротермально-метасоматические системы как важнейший фактор формирования элементов нефтегазоносного комплекса в баженовско-абалакских отложениях // Георесурсы. 2021. Т. 23, № 2. С. 142–151. DOI: [10.18599/grs.2021.2.14](https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.14).

Козлова Е.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А. и др. Технология исследования геохимических параметров орга-

нического вещества керогенонасыщенных отложений (на примере баженовской свиты, Западная Сибирь) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 44–53.

Кораго А.А., Козлов А.В. Текстуры и структуры жильного кварца хрусталеносных областей. Л.: Недра, 1988. 159 с.

Латыпова М.Р., Краснова Е.А., Калмыков А.Г. и др. Определение типа вторичных преобразований по изотопным характеристикам карбонатных пород абалакского комплекса // Сб. XXII симпозиума по геохимии изотопов имени академика А.П. Виноградова: Тез. докл. М., 2019. С. 288–294.

Латыпова М.Р., Прокофьев В.Ю., Балушкина Н.С. и др. Выявление низкотемпературных гидротермальных процессов в баженовско-абалакском комплексе по группе геохимических индикаторов прогресса // Сб. XXV НПК «Пути реализации нефтегазового потенциала Западной Сибири». Ханты-Мансийск, 2022. С. 180–187.

Марунова Д.А., Пронина Н.В., Калмыков А.Г. и др. Стадии преобразования органического вещества пород тутлеймской свиты в зависимости от его мацерального состава // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 6. С. 86–97.

Недоливко Н.М., Ежова А.В. Петрографические исследования терригенных и карбонатных пород-коллекторов. Томск: Изд-во политех. ун-та, 2012. 172 с.

Немова В.Д., Колосков В.Н., Гаврилов С.С., Покровский Б.Г. Стадийность и направленность вторичных преобразований пород-коллекторов нижнетутлеймской подсвиты на западе широтного приобья // Геология нефти и газа. 2010. № 6. С. 22–28.

Прокофьев В.Ю. Типы гидротермальных рудообразующих систем (по данным исследования флюидных включений) // Геология рудных месторождений. 1998. № 6. С. 514–528.

Прокофьев В.Ю., Пэк А.А. Проблемы оценки глубины формирования гидротермальных месторождений по данным о давлении минералообразующих флюидов // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 1. С. 3–24.

Реддер Э. Флюидные включения в минералах: В 2 т. М.: Мир, 1987.

Решение 6-го Межвед. стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратигра-

фических схем мезозойских отложений Западной Сибири. Новосибирск, 2004. 148 с.

Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Т. 1. Типы литогенеза и их размещение на поверхности Земли. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 212 с.

Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. М.: Недра, 1981. 143 с.

Ферсман А.Е. Геохимия России. Вып. 1. М.: Науч. химико-техн. изд-во, 1922. 227 с.

Фролов В.Т. Литология: Учеб. пособие. Кн. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 432 с.

Хотылев А.О., Майоров А.А., Худолей А.К. и др. Гранитоидные массивы Краснотенского свода в Западной Сибири: состав, строение, возраст и условия формирования // Геотектоника. 2021. № 2. С. 70–93. DOI: 10.31857/S0016853X21020053.

Behar F., Beaumont V., Penteado De B. Rock-Eval 6 technology: Performances and developments // Oil and Gas Sci. and Technology. Rev. IFP. 2001. Vol. 56, N 2. P. 111–134.

Brown P. FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Amer. Mineral. 1989. Vol. 74. P. 1390–1393.

Burruss R.C. Diagenetic palaeotemperatures from aqueous fluid inclusions: re-equilibration of inclusions in carbonate cements by burial heating // Mineral. Mag. 1987. T. 51, N 362. P. 477–481.

Espitalie J., Bordenave M.L. Rock-Eval pyrolysis // Applied Petroleum Geochemistry. P.: Technip ed., 1993. P. 237–361.

Jarvie D.M., Claxton B.L., Henk F., Breyer J.T. Oil and shale gas from the Barnett Shale, Fort Worth basin, Texas. AAPG National Convention, June 3–6, 2001, Denver, CO // AAPG Bull. 2001. Vol. 85, N 13 (Supplement). P. A100.

Li C., Chen H. Discussion on the GOI threshold for hydrocarbon migration and accumulation // Proceedings of the XIII Intern. Conference on Thermobarogeochemistry and the IV APIFIS Symposium. 2008. Vol. 1. P. 61–63.

Li R., Du X., Chi Y. Analysis of organic inclusions using fluorescence microscopy and Micro-FT. IR Techniques // Chinese jo. Geochemistry. 2001. Vol. 20, N 1. P. 88–96.

Статья поступила в редакцию 27.01.2023,
одобрена после рецензирования 22.03.2023,
принята к публикации 22.05.2023