

УДК 553.982.2

А.Ю. Юрченко¹, Н.С. Балущкина², Г.А. Калмыков³, Р.А. Хамидуллин⁴,
Н.И. Коробова⁵, В.Н. Блинова⁶

СТРОЕНИЕ И ГЕНЕЗИС ИЗВЕСТНЯКОВ НА ГРАНИЦЕ АБАЛАКСКОЙ И БАЖЕНОВСКОЙ СВИТ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО БАСЕЙНА⁷

В кровле абалакской и/или подошве баженовской свиты в центральной части Западно-Сибирского бассейна часто присутствуют трещиноватые и кавернозные, нередко нефтепродуктивные известняки и доломиты, обозначаемые как пласт КС1. Они спорадически распределены по разрезу и площади, их генезис до конца не установлен. Исследованы особенности строения и структуры, нефтенасыщенности и состава стабильных изотопов углерода и кислорода кальцита из основной массы пород и кальцита, выполняющего трещины в породах пласта КС1, вскрытого 6-ю скважинами. Сферолитовая микроструктура и изотопный состав углерода и кислорода кальцита основной массы известняков ($\delta^{13}\text{C}$ от -14 до -26‰ VPDB ; $\delta^{18}\text{O}$ от 0 до -5‰ VPDB) указывают на их осаждение в результате микробиальной деятельности на поверхности или в верхней части осадков в условиях высокой концентрации метана. Трещины и каверны выщелачивания известняков часто интенсивно нефтенасыщены, минерализованы крупнокристаллическими кальцитом, пиритом, кварцем, реже баритом. Такая минерализация, а также изотопный состав кислорода кальцита (до -18‰ VPDB) указывают на его осаждение при повышенной температуре (до 120°C) в катагенезе и/или в результате деятельности гидротермальных растворов.

Ключевые слова: Западная Сибирь, известняки, абалакская свита, изотопные исследования карбонатов, метан-производные карбонаты.

At the top of Abalak and/or bottom of Bazhenov formation fractured cavernous often oil-bearing carbonate rocks are present in the Central West Siberia. They are sporadically distributed. The question about its genesis is debatable. Structural characteristics, oil-bearing capacity and stable isotopes distribution of the carbonate rocks from six wells have been studied. Spherulitic microstructure of limestones together with stable isotopes distribution ($\delta^{13}\text{C}$ from -26 to -14‰ VPDB ; $\delta^{18}\text{O}$ from -5 to 0‰ VPDB) indicate that the carbonate material precipitated as a result of microbial activity on top and/or in the upper part of sediments in the conditions of high methane concentrations. Fractures and caverns filled by calcite are often oil-bearing, contain crystals of quartz, pyrite, less often barite. Such mineralization together with isotopic data ($\delta^{18}\text{O}$ up to -18‰ VPDB) indicate that minerals precipitated from hydrothermal fluids that could migrate from underlying strata.

Key words: West Siberia, limestones, Abalak formation, isotopic investigation of carbonates, methane-derived carbonates.

Введение. Баженовская свита — основная нефтематеринская свита Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. В 1968 г. впервые были получены притоки нефти из баженовского горизонта на Салымском месторождении. Со времени получения первых притоков высказывались

мнения о приуроченности коллекторов баженовской свиты к присутствующим в ее разрезах карбонатным породам [Нестеров, 1979; Мормышев, Завьялец, 1985; Сонич, 1985; Белкин и др., 1983; Зубков и др., 1986]. С наличием карбонатных пород связана промышленная продуктивность и аба-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail*: annette1988@inbox.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail*: nataliabalushkina@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, ст. науч. с.; *e-mail*: gera64@mail.ru

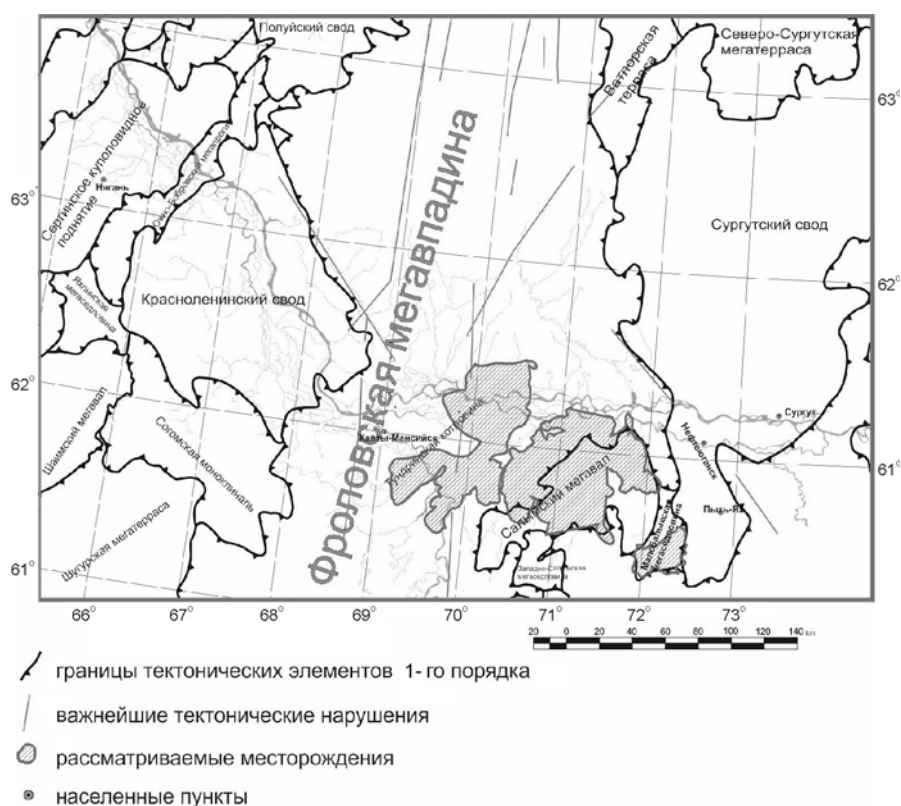
⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, науч. с.; *e-mail*: khra@geol.msu.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, ассистент; *e-mail*: nataliya.korobova@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, науч. с.; *e-mail*: vblinova@mail.ru

⁷ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-31344).

Рис. 1. Схематическая тектоническая карта Центральной части Западно-Сибирской плиты, по [Шпильман и др., 1998], с изменениями



лакской свиты. Это доказано на основе результатов высокоточной термометрии на ряде продуктивных скважин Салымского, Красноленинского, Средне-Назымского месторождений [Добрынин, Мартынов, 1980; Добрынин, 1982]. Пустотную емкость карбонатных пород абалакской свиты формируют многочисленные трещины и каверны.

Карбонатные трещинно-кавернозные породы, приуроченные к кровле абалакской свиты и/или к подошве баженовской свиты, впервые выделены и изучены на Салымском месторождении В.И. Белкиным, который присвоил им сокращенное обозначение КС1 (корреляционный слой 1) [Белкин и др., 1983]. Это название прочно закрепилось в научной литературе.

В Сургутском и Салымском районах карбонатные породы абалакской свиты рассматриваются как часть пласта Ю₀ баженовской свиты [Халимов, 2008; Филина, 1984].

Несмотря на давно доказанную нефтепродуктивность, трещинно-кавернозные карбонаты абалакской свиты характеризуются слабой прогнозируемостью, это связано с неустановленным генезисом этих пород, поэтому необходимо их отдельно и детально изучать.

Объект, материалы и методы исследования. Объектом исследования послужили нефтенасыщенные карбонатные трещиноватые и кавернозные известняки пласта КС1, вскрытые 6-ю разведочными скважинами в центральной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна в пределах Салымского мегавала, Малобалыкской мегаседловины, Тундринской котловины (рис. 1). Глубина залегания карбонатных пород изменяется

от 2905 до 3031 м. Притоки воды из слоя КС1 до начала разработки не получены.

Методы исследования карбонатов включали литологическое описание колонок полноразмерного керна, карбонатометрию, изучение петрографических шлифов и анализ распределения стабильных изотопов углерода и кислорода кальцита.

Измерение фильтрационно-емкостных свойств проводилось на стандартных цилиндрических образцах длиной и диаметром 30 мм до экстракции их органическими растворителями [Хамидуллин и др., 2013].

Определение открытой пористости по керосину проводили в соответствии с ГОСТ 26450.1-85 [ГОСТ 26450.0-85 — ГОСТ 26450.2-85]. Абсолютная газопроницаемость по азоту определялась по ГОСТ 26450.2-85.

Изотопный анализ проводили на комплексе оборудования для анализа стабильных изотопов легких элементов «Delta V Advantage» (производитель «Thermo Fisher Scientific», Бремен, Германия). Высушенные и измельченные образцы подвергались обработке полифосфорной кислотой при температуре 70 °C на линии пробоподготовки «Gas Bench II», подключенной к изотопному масс-спектрометру. Анализировали состав стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) углекислого газа, выделившегося в результате реакции кальцита с кислотой. Точность измерений контролировалась по международным стандартам NBS-19 и NBS-18. Изотопные значения указаны в промилле (‰) в международной шкале VPDB. Каждый образец анализировали дважды. Ошибка определения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ составляет 0,1‰.

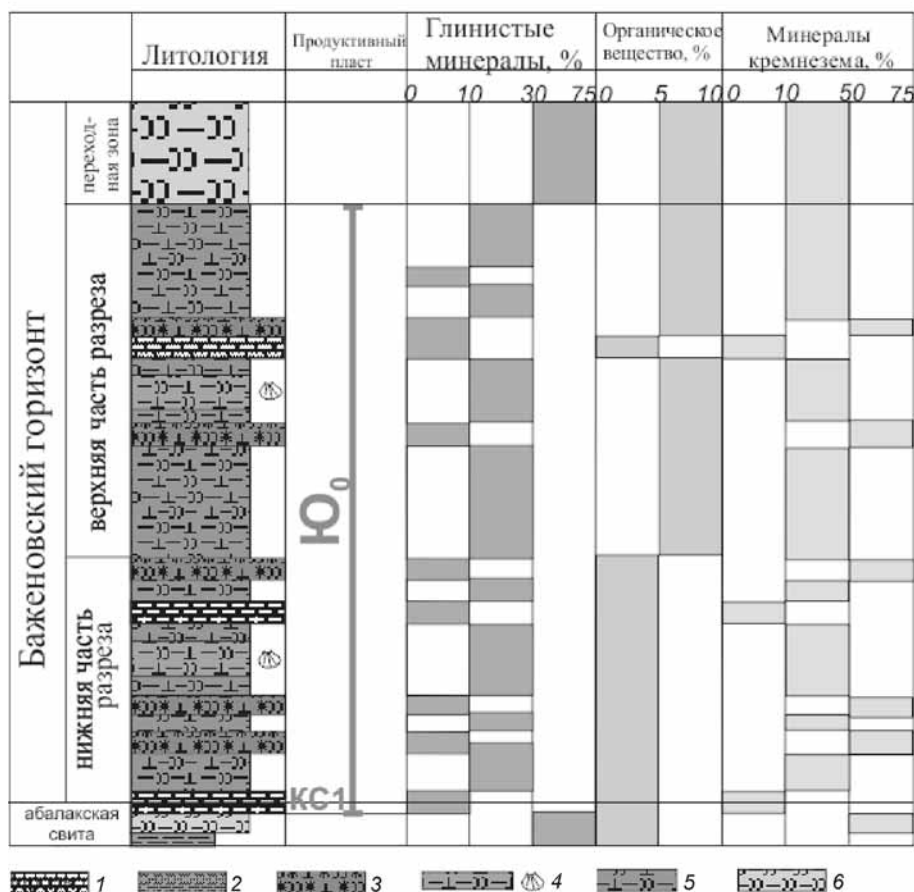


Рис. 2. Схема строения разреза отложений абалакско-баженовского комплекса и положение пласта КС1: 1 — карбонаты, 2 — глинистые с глауконитом, 3 — силициты и карбонатизированные силициты, 4 — карбонатно-глинистые силициты с двустворками, 5 — глинистые силициты, 6 — кремнисто-глинистые и алевроитово-глинистые породы

Интерпретация аналитических данных. Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$) указывает на источник суммарной углекислоты, которая растворена в воде, участвующей в формировании карбонатного материала [Фор, 1989]. Нормальные морские карбонаты, как и карбонатные раковины морских организмов, характеризуются значениями $\delta^{13}\text{C}$, близкими к составу морской воды, — $\sim 0\text{‰ VPDB}$.

Обогащение карбонатов легким изотопом углерода указывает на образование их с участием изотопно-легкой биогенной углекислоты, образующейся либо в процессе диагенеза при разложении органического вещества (ОВ), либо в результате микробиальной переработки метана в верхней части осадков.

Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) зависит от температурных условий, в которых осаждается карбонатный материал. Это связано с реакцией изотопного обмена, зависящей от температуры. На основе исследования изотопного состава кислорода в карбонатах был предложен метод расчета палеотемператур древних океанов [Фор, 1989]. Значения палеотемпературы мы рассчитывали по эмпирическим зависимостям, предложенным в работе [Kim, O'Neil, 1997].

При исследовании морских карбонатов для достижения точности палеотемпературных определений необходимо выполнять ряд важных условий. Во-первых, необходимо знать величину

$\delta^{18}\text{O}$ морской воды, находившейся в равновесии с образцом. С этой целью мы провели измерения изотопного состава кальцита неизменных роствов белемнитов из абалакской свиты, который отражает состав и температуру морской воды абалакского времени. Во-вторых, на фракционирование изотопов кислорода значительно влияет состав карбонатных минералов. Для арагонита, кальцита, магнезиального кальцита и доломита выведены свои зависимости. Поэтому для каждого образца помимо изотопного состава изучен минеральный состав и определены тип и концентрация карбонатных минералов.

Морфология карбонатных пород, их минеральный состав и положение в разрезе абалакско-баженовского комплекса. Мощность пласта КС1, его минеральный состав и положение в разрезах изучаемых скважин варьируют. Чаще всего этот пласт приурочен к кровле абалакской свиты, реже он может встречается и в баженовской свите (рис. 2). Иногда в одном разрезе отмечено до 5 карбонатных пластов, разделенных глинистыми и кремнисто-глинистыми породами, нарушенными зеркалами скольжения. Мощность карбонатных пластов варьирует от 0,1 до 1,02 м, мощность разделяющих их глинистых и кремнисто-глинистых пород от 0,1 до 1,6 м.

Породы пласта КС1 имеют брекчиевидную структуру, приобретенную за счет развития сети

Рис. 3. Фото кристаллов кварца в трещинах в параллельных (слева) и скрещенных (справа) николях (*a*); фото пирита, заполняющего трещины в известняках (*б*); фото скопления кристаллов пирита в трещине, изображение РЭМ (*в*); фото пиритизации основной массы известняков в параллельных (слева) и скрещенных (справа) николях (*г*)

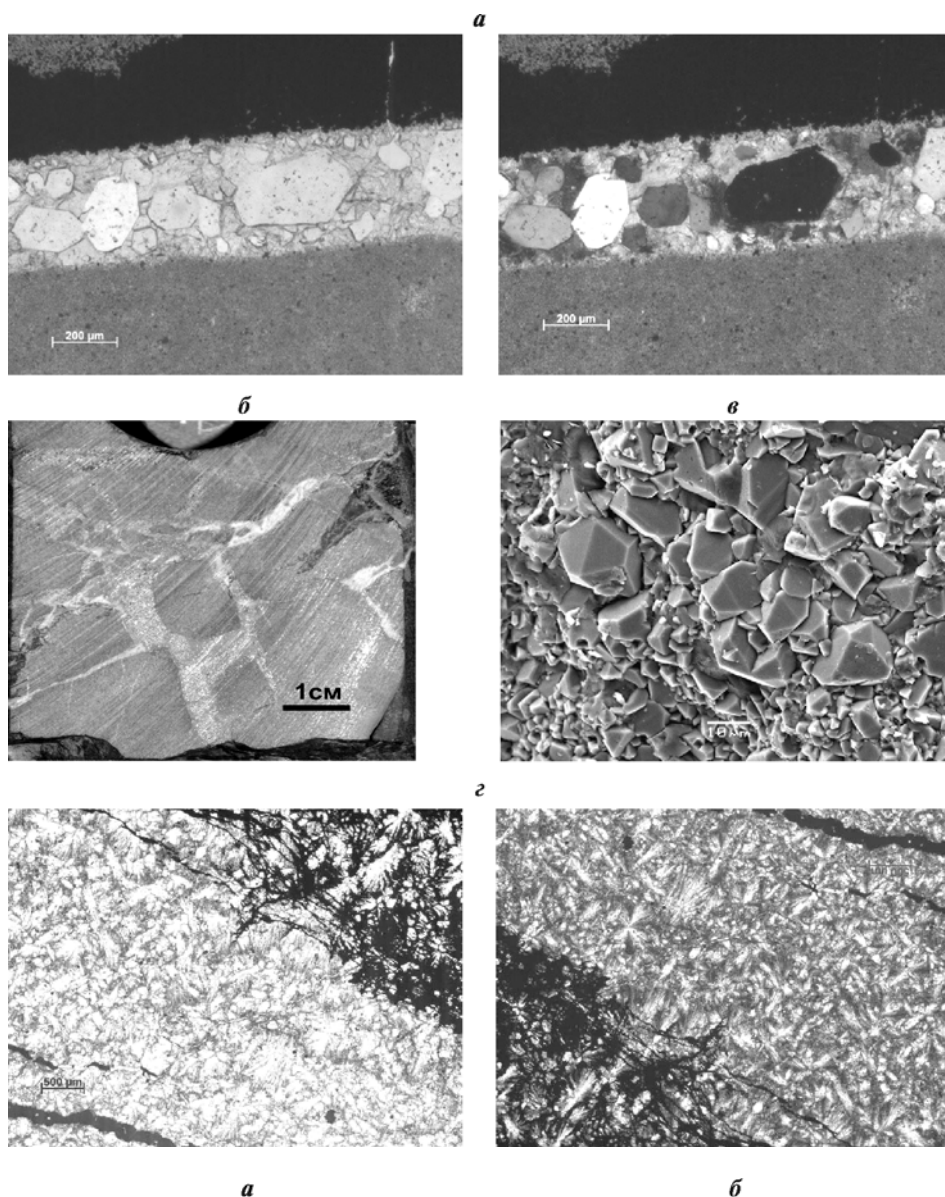
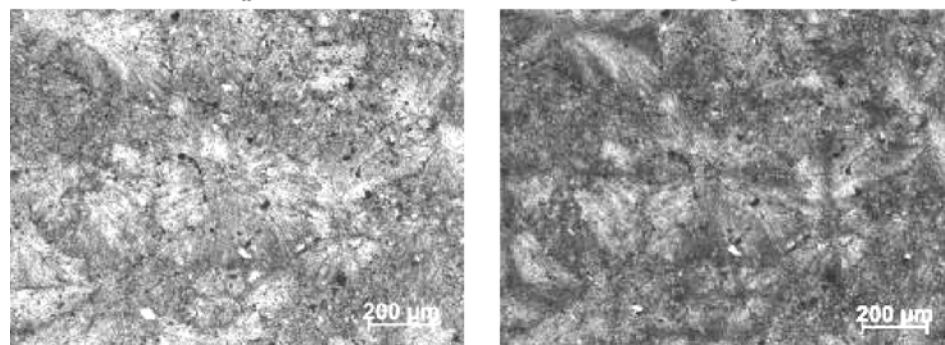


Рис. 4. Фото сферолитовой структуры известняков матрицы пласта КС1: *a* — николи параллельные, *б* — скрещенные



разнонаправленных трещин, частично или полностью минерализованных кальцитом, доломитом. Протяженность трещин изменяется от 2–3 до 350 см, ширина — от 0,1 до 10 см. Помимо кальцита в трещинах отмечаются кристаллы кварца размером до 0,7×0,5 см (рис. 3, *a*), пирита (рис. 3, *б–г*).

Основная масса пород пласта КС1 (далее матрица) имеет серый и буро-серый цвет, сложена известняками, доломитами и смешанными известково-доломитовыми породами.

Микроструктура известняков матрицы сферолитовая (рис. 4). Подобная микроструктура встречается в карбонатах, осаждающихся в результате микробиальной переработки метана в районах фокусированной разгрузки углеводородных (УВ) флюидов на морском дне (рис. 5). На границе известняков основной массы и жильного кальцита, выполняющего трещины, наблюдаются измененные породы матрицы, сохранившие сферолитовую микроструктуру (рис. 6).

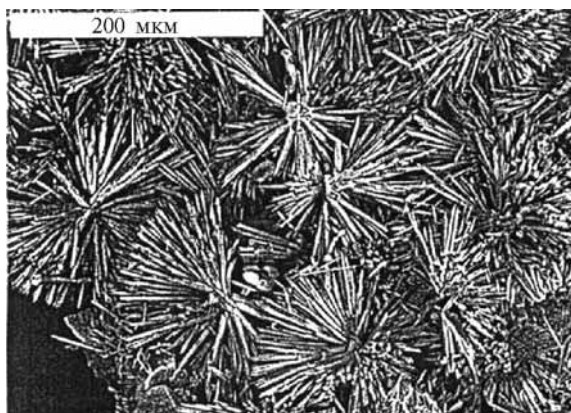


Рис. 5. Радиально-лучистые агрегаты в современных сиповых постройках Черного моря, РЭМ. Фото А.Ю. Лейн

Известняки основной массы пород слоя КС1 характеризуются низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС): $K_{\text{пср}}=0,54\pm0,88\%$, $K_{\text{пр}}=0,01\pm0,05$ мД, а также крайне низким нефтенасыщением. На фото колонок полноразмерного керна видно, что для основной массы пород характерно отсутствие или очень слабое свечение в ультрафиолетовых лучах. Нефтенасыщение пород пласта КС1 приурочено к поверхностям разнонаправленных трещин и связанных с ними каверн выщелачивания. Характер минерализации трещин и свечения их в ультрафиолетовом освещении позволяет выделить от одной до четырех стадий заполнения их органоминеральным веществом (рис. 7). Центральная часть трещин, отвечающая

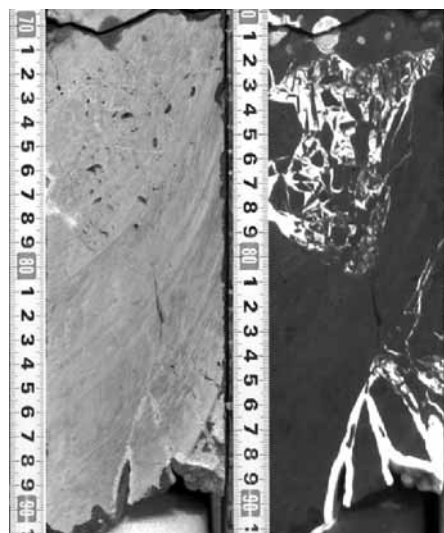


Рис. 6. Фото известняка со сферолитовой структурой и трещинами, залеченными кальцитом и доломитом. Николи параллельны

последнему этапу минерализации, имеет белый или бежевый цвет в дневном свете и голубой или зеленый цвет в ультрафиолетовом освещении. Карбонаты, оконтуривающие центральную часть трещины (зона контакта), имеют бурый и коричневый цвет как при дневном, так и при ультрафиолетовом освещении. Бурый цвет обусловлен нефтенасыщенностью пород.

В соответствии с характером минерализации трещин пробы для изотопных исследований были

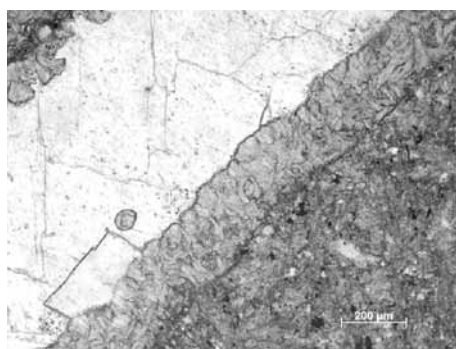


Рис. 7. Фото породы пласта КС1 при дневном и ультрафиолетовом освещении

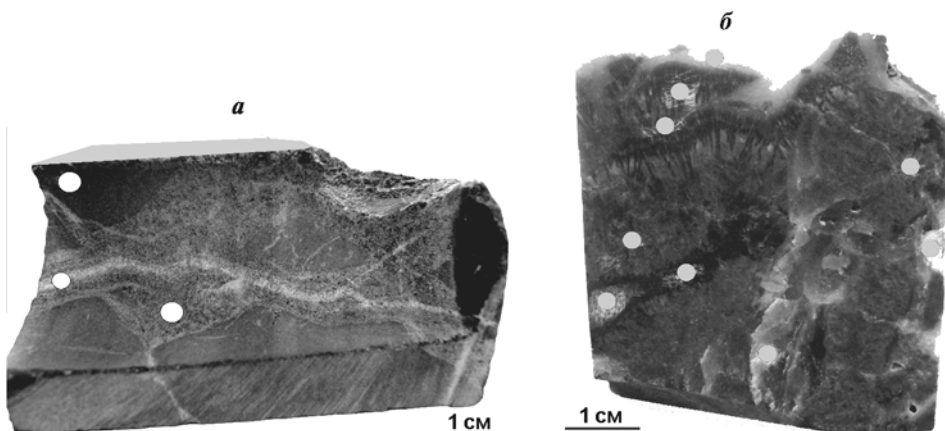


Рис. 8. Точки отбора проб для изотопных исследований: а — в известняке со сферолитовой структурой, с трещинами, залеченными кальцитом; б — в кальцитизированной, неравномерно нефтенасыщенной трещине

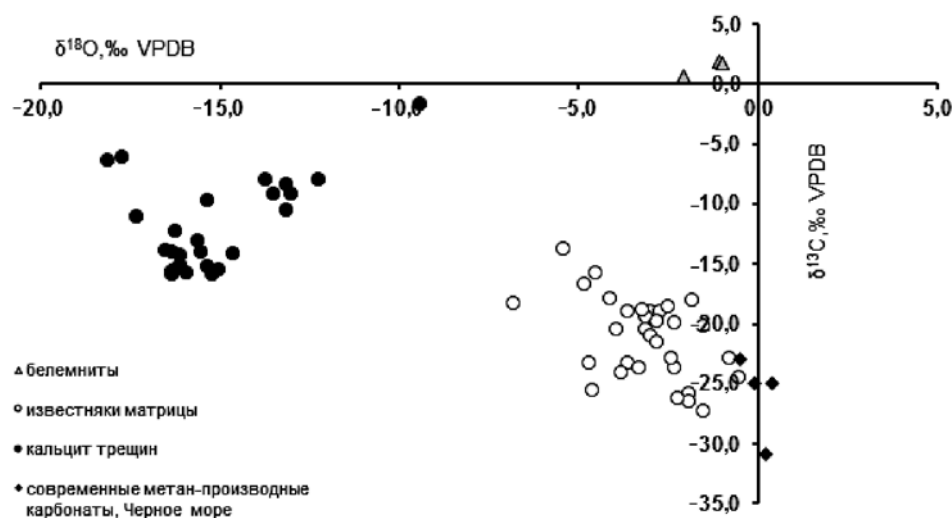


Рис. 9. Соотношение изотопного состава углерода и кислорода в карбонатных породах пласта KC1, белемнитах абалакской свиты, а также в современных метан-производных карбонатах Черного моря [Reitner et al., 2005]

отобраны из матрицы пород, из центральных частей трещин и на разном удалении от центров трещин (рис. 8, а), а также из зон, отвечающих разным стадиям заполнения, как показано на рис. 8, б. Всего проанализировано 60 проб из 37 образцов.

Результаты исследований и их обсуждение.

Результаты анализа распределения стабильных изотопов углерода и кислорода в исследованных известняках пласта KC1 представлены на рис. 9.

Среди образцов известняков проанализирован изотопный состав углерода и кислорода белемнитов (*Belemnitida*) из верхов абалакской свиты. Изотопный состав карбонатного материала неизменных ростров белемнитов отражает морские условия конца абалакского времени. Расчетные значения температуры указывают на теплую, гумидную обстановку: $+(15 \div 20)^\circ\text{C}$. Значения $\delta^{13}\text{C}$ отвечают нормальным морским организмам, $\delta^{18}\text{O}$ белемнитов варьирует от -1 до -2‰ VPDB . Эти значения при расчете палеотемпературы принимались соответствующими изотопному составу воды.

Известняки матрицы и кальцит, выполняющий трещины в них, значительно различаются по соотношению стабильных изотопов углерода и кислорода.

Известняки матрицы обогащены легким изотопом углерода ($\delta^{13}\text{C} = -13,8 \div -27,4\text{‰ VPDB}$), что свидетельствует о биогенном источнике углекислоты, участвовавшей в их формировании. По значениям $\delta^{18}\text{O}$ известняков матрицы, лежащим в диапазоне от $-5,3$ до $-0,1\text{‰ VPDB}$, можно сделать вывод о том, что они образовались в приповерхностных условиях в осадке и почти не затронуты вторичными преобразованиями при литогенезе: $\delta^{18}\text{O}$ карбонатов на $0\text{--}3\text{‰}$ облегчен по сравнению с таковым белемнитов того же возраста. Распространенный процесс, в результате которого образуются карбонаты, обогащенные легким изотопом

углерода, — анаэробное окисление метана (АОМ), заключающееся в микробиальной переработке метана. Процесс АОМ распространен в районах фокусированной разгрузки УВ на морском дне. Специфическая сферолитовая микроструктура известняков, встречающаяся в современных силовых карбонатах, также свидетельствует о микробиальной природе исследуемых известняков.

Кальцит, выполняющий трещины в известняках, обогащен легким изотопом кислорода по сравнению с известняками матрицы, что свидетельствует о более высокой температуре их образования (расчетные значения температуры $84\text{--}120^\circ\text{C}$ и более). Наиболее легкие значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют -18‰ VPDB , что соответствует температуре 122°C (при значениях $\delta^{18}\text{O}$ пластовой воды -1‰ VPDB), т.е. образование кальцита происходило, вероятно, за счет поступления высокотемпературных глубинных растворов, что подтверждается наличием в трещинах крупнокристаллического пирита, прозрачного кварца. Кальцит трещин также обогащен легким изотопом углерода по сравнению с белемнитами: $\delta^{13}\text{C} = -16 \div -6\text{‰ VPDB}$. Вероятно, источник углекислоты был смешанный: изотопно-тяжелый седиментогенный и легкий, поступающий из ОВ/УВ.

Заключение. Осаждение кальцита известняков матрицы и кальцита, выполняющего трещины, происходило на разных стадиях литогенеза и в разных условиях окружающей среды.

Известняки матрицы со сферолитовой и комковатой структурой, обладающие низкими фильтрационно-емкостными свойствами, значительно обогащены легким изотопом углерода при изотопных характеристиках кислорода, соответствующих окружающей морской воде. Подобное распределение характерно для карбонатов, в образовании которых участвовала углекислота, образованная вследствие процесса АОМ. В современной научной литературе такие карбонаты получили на-

звание метан-производные аутигенные карбонаты (methane-derived authigenic carbonates) [Hathaway, Degenes, 1968; Fuex, 1977; Nissenbaum, 1984]. В Мировом океане известно немало примеров современного осаждения изотопно-легких метан-производных карбонатов в районах подводной разгрузки УВ флюидов на морском дне [Canet et al., 2003; Diaz-del-Rio et al., 2003; Sassen et al., 2004; Formolo et al., 2004; Campbell et al., 2002; Campbell, 2006; Leon et al., 2007]. Данные исследований изотопного состава углерода и кислорода древних карбонатов позволяют диагностировать следы разгрузки углеводородных флюидов на морском дне

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белкин В.И., Ефремов В.П., Каптеллинин Н.Р. Модель коллекторов нефти баженовской свиты // Нефть. хоз-во. 1983. № 10. С. 27–31.
- ГОСТ 26450.0-85 — ГОСТ 26450.2-85. М.: Изд-во стандартов, 1985.
- Добрынин В.М. Проблемы коллектора нефти в битуминозных породах баженовской свиты // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1982. № 3. С. 120–127.
- Добрынин В.М., Мартынов В.Г. Модель и основные параметры пластового резервуара баженовской свиты Салымского месторождения // Нефтеносность баженовской свиты Западной Сибири. М.: ИГиРГИ, 1980. С. 26–47.
- Зубков М.Ю., Сонич В.П., Зарипов О.Г. Геологические и литолого-геохимические критерии промышленной нефтеносности отложений баженовской свиты Западной Сибири // Проблемы нефтеносности баженовской свиты Западной Сибири. М., 1986.
- Мормышев В.В., Завьялец А.Н. Схема строения и обоснование режима разработки пласта Ю₀ Салымского месторождения // Особенности подсчета запасов нефти в баженовских отложениях Западной Сибири. Тюмень: СибНИИ НП, 1985.
- Нестеров И.И. Новый тип коллектора нефти и газа // Геология нефти и газа. 1979. № 10. С. 26–29.
- Сонич В.П. Тип коллектора в породах баженовской свиты и механизм его образования // Особенности подсчета запасов нефти в баженовских отложениях Западной Сибири. Тюмень: СибНИИ НП, 1985.
- Филина С.И., Корж М.В., Зонн М.С. Палеогеография и нефтеносность баженовской свиты Западной Сибири. М.: Наука, 1984.
- Фор Г. Основы изотопной геологии. М: Мир, 1989.
- Халимов Э.М. Залежи нефти в баженовской свите — нетрадиционный объект разведки и разработки // Докл. на рабочем семинаре «Нефтегазоносность отложений баженовской свиты: проблемы и решения» (КНТЦ ОАО «НК «Роснефть», Москва). М., 2008.
- Хамидуллин Р.А., Калмыков Г.А., Корост Д.В., Ба-лушкина Н.С., Бакай А.И. Фильтрационно-емкостные свойства пород баженовской свиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2013. № 5. С. 57–64.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза // Литологическая геохимия. М.: Геопринт, 2011.
- Campbell K.A. Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and Paleontology: Past developments and future research directions // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2006. Vol. 232. P. 362–407.
- Campbell K.A., Farmer J.D., Des Marais D. Ancient hydrocarbon seeps from the Mesozoic convergent margin of California: carbonate geochemistry, fluids and palaeoenvironments // Geofluids. 2002. Vol. 2. P. 63–94.
- Canet C., Rosa M.P., Melgarejo J., Reyes A. Methane-related carbonates formed at submarine hydrothermal springs: a new setting for microbially-derived carbonates? // Marine Geology. 2003. Vol. 199. P. 245–261.
- Diaz-del-Rio V., Somoza L., Martinez-Frias J. et al. Vast fields of hydrocarbon-derived carbonate chimneys related to the accretionary wedge/olistostrome of the Gulf of Cadiz // Marine Geology. 2003. Vol. 195. P. 177–200.
- Formolo M.J., Lyons T.W., Zhang C.L. et al. Quantifying carbon sources in the formation of authigenic carbonates at gas hydrate sites in the Gulf of Mexico // Chem. Geol. 2004. Vol. 205. P. 253–264.
- Fuex A.N. The use of stable carbon isotopes in hydrocarbon exploration // J. Geochim. Explor. 1977. Vol. 7. P. 155–198.
- Hathaway J.C., Degenes E.I. Methane-derived marine carbonate of Pleistocene age // Science. 1968. Vol. 165. P. 690–692.
- IAEA-Tecdoc-825. Reference and intercomparison materials for stable isotopes of light elements. Proceedings of a consultants meeting. Vienna, 1993.
- Kim S.-T., O'Neil J.R. Equilibrium and non-equilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. Vol. 61. P. 3461–3475.
- Leon R., Somoza L., Medialdia T. et al. Sea floor features related to hydrocarbon seeps in deepwater carbonate-mud mounds of the Gulf of Cadiz: from mud flows to carbonate precipitates // GeoMarine Lett. 2007. Vol. 27. P. 237–247.
- Nissenbaum A. Methane derived organic matter and carbonates // Org. geochem. 1984. Vol. 5, N 4. P. 187–192.
- Peckmann J., Thiel V. Carbon cycling at ancient methane-seeps // Chem. Geol. 2004. Vol. 205. P. 443–467.
- Reitner J., Peckmann J., Reimer A. et al. Methane-derived carbonate build-ups and associated microbial communities at cold seeps on the lower Crimean shelf (Black Sea) // Facies. 2005. Vol. 51. P. 66–79.
- Sassen R., Roberts H.H., Carney R. et al. Free hydrocarbon gas, gas hydrate and authigenic minerals in chemosynthetic communities of the northern Gulf of Mexico continental slope: relation to microbial processes // Chem. Geol. 2004. Vol. 205. P. 195–217.