

Состав и характер преобразований углеродсодержащих пород нижнего силура на контакте с пермо-триасовыми трапповыми комплексами западной части Южно-Тунгусской НГО

*А. О. Гордеева, О. Н. Злобина**

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: ZlobinaON@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Проведён детальный петрографический анализ сульфатно-карбонатных, прослоями углеродисто-глинистых отложений нижнего силура из разреза западной части Южно-Тунгусской нефтегазоносной области (НГО) с целью установления закономерностей их преобразований на контакте с пермо-триасовыми силлами. Полученные данные сопоставлены с замерами температур по кальцит/доломитовому термометру, выполненными ранее. Предполагается, что нелинейность зависимости между величиной нагревания осадочных толщ и мощностью интрузива связана с неоднородностью разреза по минеральному составу различных слоёв, их толщине и количеству содержащегося органического вещества (ОВ). Результаты исследования зоны контакта свидетельствуют о возможной графитизации не только углеводородов, но и карбонатного материала. Исходя из этого, предлагается в качестве максимальной температуры контактового метаморфизма, заложенной в физико-химическом обосновании математической модели, использовать температуру разложения карбонатов с учётом давления. Процесс протекал с увеличением пустотного пространства за счёт потерь при прокаливании и формирования системы трещиноватости, масштабность развития которой оказывала прямое влияние на преобразования пород, в том числе удалённых от интрузии.

Ключевые слова: углеродсодержащие породы, пермо-триасовые силлы, кальцит/доломитовый термометр

Composition and character of transformations of the lower silurian carbon-containing rocks at contact with permo-triassic trap complexes on the western part of South Tunguska OGR

*A. O. Gordeeva, O. N. Zlobina**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian
Federation

* e-mail: ZlobinaON@ipgg.sbras.ru

Abstract. A detailed petrographic analysis of the Lower Silurian sulfate-carbonate deposits with carbonaceous interlayers from the section of the western part of the South Tunguska oil and gas region was carried out in order to establish the patterns of their transformations at contact with the Permian-Triassic sills. The data obtained are compared with temperature measurements on a calcite/dolomite thermometer performed earlier. It is assumed that the non-linearity of the dependence between the amount of heating of sedimentary strata and the power of intrusiv is associated with the heterogeneity of the section in the mineral composition of various layers, their thickness and the amount of organic matter contained in them. Based on this, it is proposed to use the temperature of decomposition of carbonates, taking into account pressure, as the maximum temperature of contact metamorphism, laid down in the physico-chemical justification of the mathematical model. The pro-

cess proceeds with an increase in the void space due to losses during calcination and the formation of a fracturing system, the scale of development of which has a direct impact on the transformation of rocks, including located far from the intrusion.

Keywords: carbon-containing rocks, Permo-Triassic sills, calcite/dolomite thermometer

Актуальность изучения процессов, происходящих в углеродсодержащих осадочных породах на их контакте с трапповыми интрузиями, связана с необходимостью установления закономерностей в преобразованиях минеральных и органических компонентов, особенностей миграции газов и органического вещества – основных факторов, контролирующих формирование залежей углеводородов. Принципиальная физико-химическая модель для сульфатно-карбонатных водосодержащих пород в присутствии углеводородов при нагревании их до максимальных температур контактового метаморфизма (порядка 700 °С) была рассчитана в Институте геологии СО РАН А.Э. Конторовичем, А.Л. Павловым, Г.А. Третьяковым, А.В. Хоменко и другими [1-3]. Комплекс экспериментов показал, что критическим для залежи можно считать расстояние, соответствующее $1/3$ мощности интрузива, где практически (для закрытой системы) весь углеводород преобразуется в графит. Деструкция углеводородов в залежах полностью прекращается на расстоянии, превышающем в 3-3,5 раза мощность интрузива. В то же время, было установлено, что зависимость между величиной нагревания, контролирующей характер изменения залежи, и мощностью интрузива носит нелинейный характер, поэтому поставленная задача требовала дальнейшего изучения. Объектом исследования в данной работе послужили сульфатно-карбонатные отложения силура, вскрытые колонковой скважиной Биробчанская 3 в интервале глубин 445,6-516,5 м. Керновый материал этой скважины, пробуренной на западе Южно-Тунгусской НГО, изучался ранее сотрудниками ИНГГ СО РАН. Ими в разрезе от верхнего кембрия до нижнего девона было выполнено описание осадочных пород и выделено четыре силла (в интервале от нижнего ордовика до нижнего силура), представленных мелкокристаллическими плагиоклаз-пироксеновыми долеритами [4]. Отложения нижнего силура отнесены к валецкой и чалбышевской свитам, представленными доломитами, в меньшей степени известняками с прослоями доломитовых мергелей. Первый силл мощностью 43 м залегает в валецкой свите, второй – мощностью 39 м расположен на 81 м ниже в чалбышевской свите. Детальный петрографический анализ, проведённый авторами в последнее время, позволил уточнить состав и характер изменений углеродсодержащих пород на участке разреза между первым и вторым силлами.

На глубине 516,5 м наблюдается резкий контакт (толщиной не более 1 мм) между базальтовым порфиритом и карбонатно-графитовой породой, вдоль которого со стороны эффузива прослеживаются многочисленные субпараллельные трещины (с величиной раскрытия до 0,02 мм), заполненные рудными минералами (пирит, магнетит), их окислами, а также, возможно, графитом. Порфировая структура породы не позволяет отнести её к интрузивным образованиям, но в ней в качестве порфировых выделений присутствуют реликтовые фрагменты

неправильной формы (диаметром 0,3-0,9 мм), сложенные долеритами в количестве ~ 5% (рис. 1А). Вероятно, некоторые участки расплава успели полностью раскристаллизоваться до момента значительного падения температуры с образованием длиннопризматических зерен плагиоклаза, интерстиции между которыми выполнены субизометричными зернами оливина и/или пироксена, замещенными тальком и эпидотом. Большая часть порфировых выделений представлена удлинёнными призмами плагиоклаза основного состава (длиной до 5,5 мм, шириной до 1,6 мм) в разной степени сосюритизированными (замещёнными тонкочешуйчатыми агрегатами цоизита, эпидота, серицита, кальцита, хлорита и др.), распределёнными одиночно или в группах (гломеровые скопления) (рис. 1Б). Основная масса между порфировыми выделениями имеет темно-коричневый цвет и выраженную микролитовую, участками фельзитовую структуры, сложена беспорядочно распределёнными микролитами основного плагиоклаза, рудными минералами (тонкой сыпью магнетита, ильменита) и плохо раскристаллизованным материалом, замещенным пелитоморфным глинистым веществом и лейкоксом.

В зоне контакта базальтовые порфириты интенсивно хлоритизированы, толщина «каёмки» хлоритизации менее 1 мм (рис. 1В). В карбонатно-графитовой породе графит скрытокристаллический (составляет до 88% в приконтактной области), трещиноватый (трещины заполнены глинистым материалом) с линейно-вытянутыми вдоль линии контакта пустотами линзовидной, неправильной формы (длиной до 4 и более мм, шириной до 0,5 мм). Пустоты имеют зональное заполнение, их стенки инкрустированы пластинчатыми и радиальнолучистыми выделениями цоизита и мусковита, центральные части выполнены слабо замутнёнными, чистыми, прозрачными монокристаллами кальцита/доломита или их блочными агрегатами. На большем удалении от контакта (глубина 516,1 м) в графитизированной породе возрастает количество карбонатных минералов (до 25%), цоизита (до 15%) и рудных компонентов (магнетит, пирротин). Пирротин (до 2%) образует пятна неправильной формы (диаметром до 0,4 мм), магнетит (до 8%) в виде хорошо окристаллизованных, достаточно равномерно рассеянных кристаллов (диаметром до 0,02 мм), которые вместе с выделениями графита (до 50%) образуют на одних участках «рыхловатый» сетчатый рисунок, на других - очень плотные агрегаты (рис. 2А). Карбонатный материал заполняет пустоты и присутствует в виде реликтовых фрагментов исходной породы (диаметром до 3 мм), интенсивно мраморизованных в краевых, иногда центральных частях. Выше по разрезу, через 2,5 м (глубина 514,6 м) залегают существенно карбонатные (доломит-кальцитовые), неоднородно мраморизованные породы с малой примесью (менее 5%) графитизированного вещества и рудных компонентов (пирит, пирротин). Текстура доломитового известняка брекчиевидная, пятнистая за счёт неравномерной перекристаллизации, деформации и возникновения сланцеватых структур в прослоях со значительной примесью глинистого материала, а также сохранения участков (диаметром до 9,5 мм) с реликтовой органогенно-обломочной структурой, образованной многочисленными, известковыми фаунистическими остатками, свободно располагающимися в тонкокристаллическом

карбонатном матриксе. Отмечаются различно ориентированные микростилолиты с мелкобугорчатой конфигурацией выступов (толщиной в расширениях до 0,47 мм), разветвляющиеся, часто сгущающиеся, заполненные пелитоморфным, реже тонкочешуйчатым глинистым веществом, микро-тонкокристаллическим доломитом и кальцитом. Замеры температур по кальцит/доломитовому термометру на глубинах 514,6-513,8 м составили 390-340°C, соответственно [4].

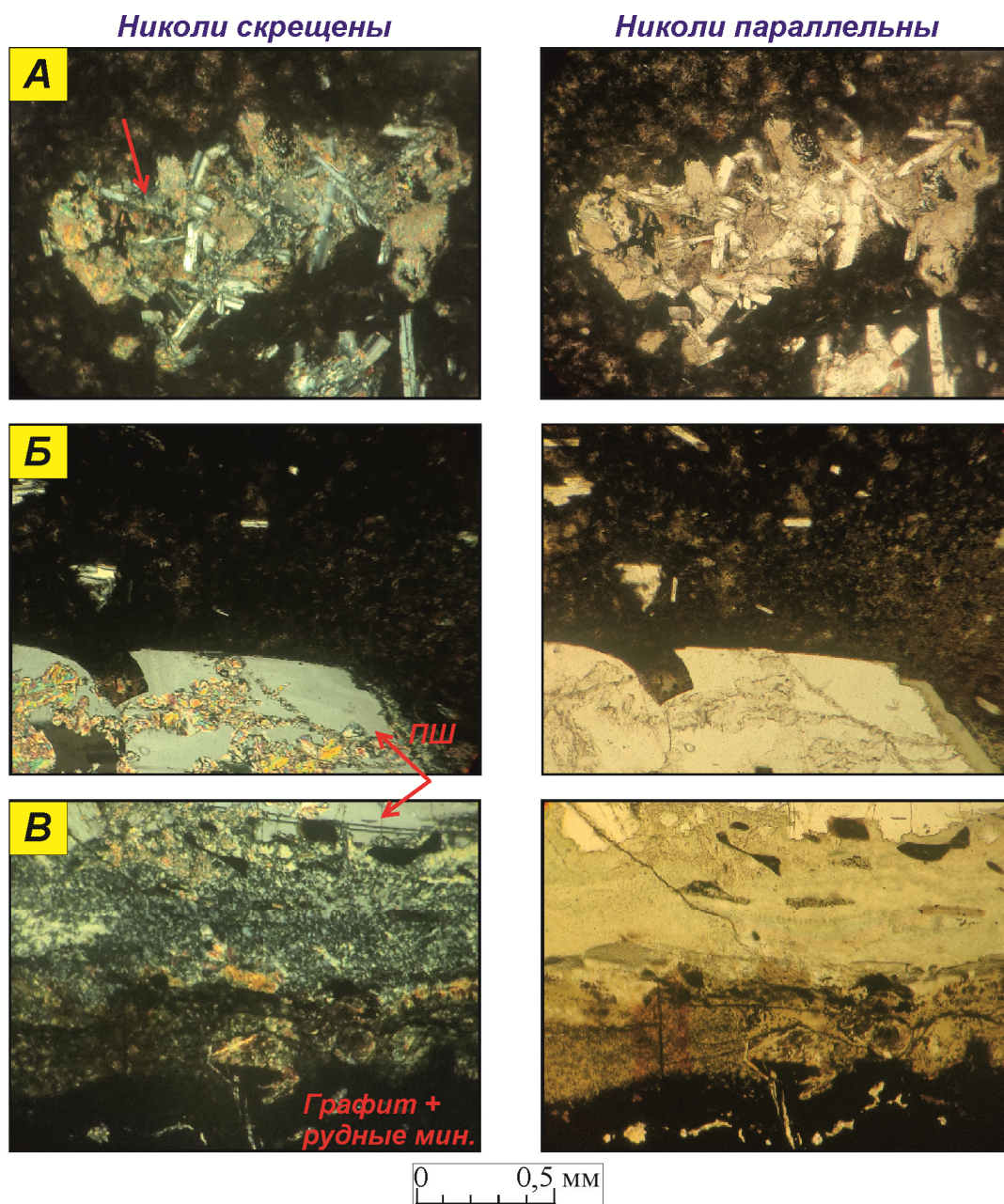


Рис. 1. Зона контакта базальтовых порфиритов с карбонатно-графитовой породой. *А* – реликтовый фрагмент долерита; *Б* – сосюритизированный плагиоклаз основного состава в порфировом выделении (нижняя часть фото), масса темно-коричневого цвета с выраженной микролитовой структурой (верхняя часть фото); *Б* – каёмка хлоритизации между плагиоклазом из порфирового выделения и графитизированным материалом

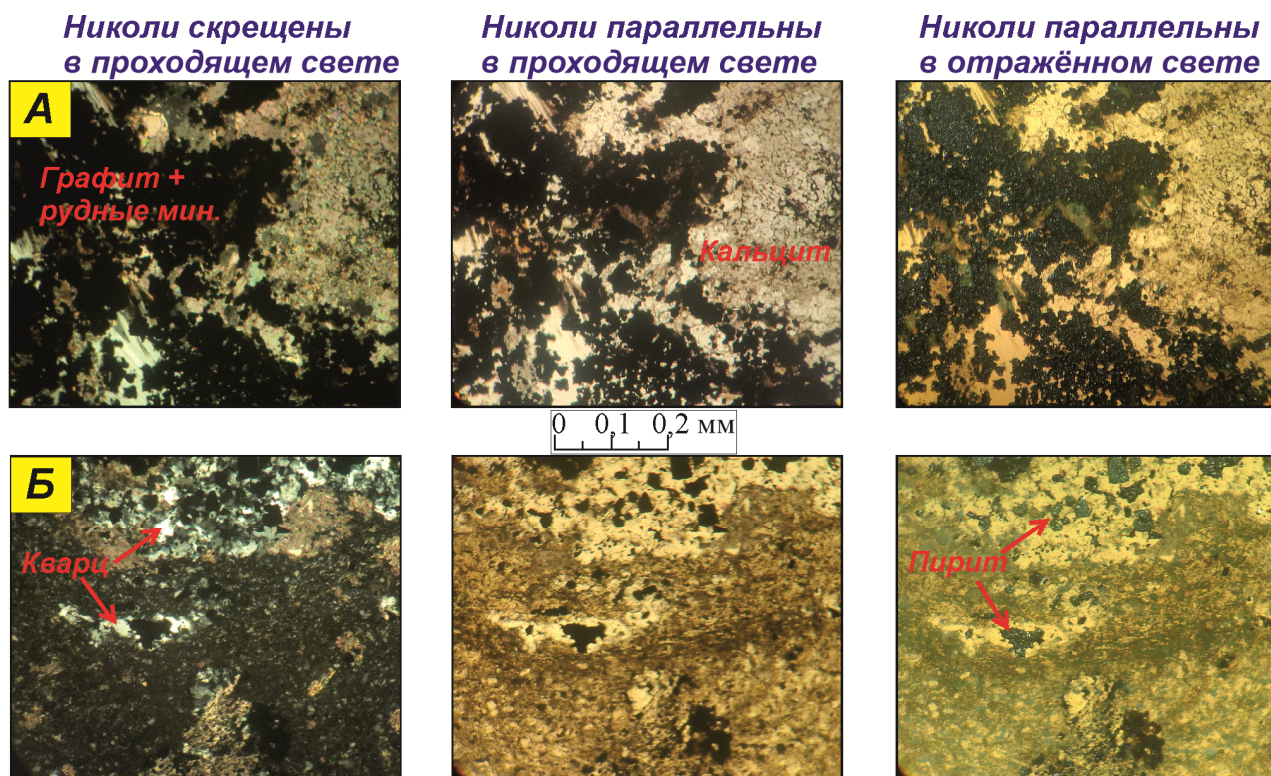


Рис. 2. Графитизированная карбонатная порода (А) приконтактной зоны нижнего силла и глинисто-сульфатная порода (Б) из средней части толщи, залегающей между силлами.

Вверх по разрезу карбонатные породы сменяются сульфатными, которые по оптическим характеристикам соответствуют полупрозрачным и непрозрачным микро-тонкокристаллическим модификациям гипса и ангидрита, возможно, из-за примеси тонкодисперсного глинистого вещества. В шлифах (образцы с глубин 511,6, 506,6 м) наблюдается достаточно плотная, очень низко двупреломляющая (в скрещенных николях) масса, сложенная тонкочешуйчатыми полупрозрачными и пелитоморфными непрозрачными агрегатами различной формы (диаметром до 0,03 мм), равномерно распределёнными друг относительно друга. Отмечаются включения пирита и пирротина (до 3,5%) в виде хорошо окристаллизованных кристаллов (диаметром до 0,08 мм), их агрегатов и скоплений, располагающихся как в основной массе, так и в трещинах (с величиной раскрытия до 0,07 мм) вместе с тонкокристаллическим волокнистым гипсом, глинистым материалом и лейкоксеном. Скрытокристаллическое углеродистое вещество (УВ), вероятно, графитизировано, заполняет интерстиции между рудными минералами с образованием черных, плотных выделений округлой (диаметром до 1,3 мм), линзовидной (длиной до 2 мм) и неправильной (причудливо-узорчатой) формы. В их краевых частях на некоторых участках развиваются тонкокристаллические агрегаты кальцита, эпидота и ангидрита, в центральных - зафиксированы одиночные кристаллы эпидота и слабо замутнённые, наиболее чистые, прозрачные разнокристаллические агрегаты кальцита/доломита. Предполагается, что УВ и рудные

компоненты заполнили пустоты, генетически связанные с развитой системой трещиноватости. Характер теплового воздействия на эти породы оценить сложно из-за недостаточной изученности переходов одних модификаций гипса/ангидрита в другие при повышенных температурах и давлении в сочетании с разнообразными минерально-органическими примесями [5, 6 и др.]. Следующие замеры по кальцит/доломитовому термометру были сделаны в существенно карбонатных породах на глубине 501,2 м, где температура составила 330°C [4]. На этом участке разреза залегают доломитистые известняки с реликтовой органогенно-обломочной структурой, образованной известковыми фаунистическими остатками, свободно располагающимися в тонкокристаллическом глинисто-карбонатном матриксе. Порода, в целом, аналогична описанной ранее, за исключением сланцеватых текстур, которые отсутствуют в прослоях, обогащённых глинистым материалом, и более низкого содержания УВ (менее 1%). Выше по разрезу выделяется пачка глинисто-карбонатно-сульфатных отложений с послойными вариациями в соотношении основных составляющих, слоистость волнисто-линзовидная, иногда нарушенная небольшими размывами и биотурбацией, участками породы пятнистого облика, за счёт скоплений сильно перекристаллизованных известковых фаунистических остатков («теневые реликты» многочисленных фрагментов панцирей иглокожих). УВ сконцентрировано, в основном, в линзовидных прослоях, возможно, стилолитах (толщиной до 2 мм), где заполняет поры между кристаллами кальцита, гипса, доломита, пирита, пирротина, ильменита. Температура от подошвы к кровле пачки (глубины 494,1-484,8 м) снижается от 320 до 310°C [4]. Вероятно, в этой части разреза (между первым и вторым силлами) породы подверглись наименьшему воздействию. В целом, в толще мощностью около 30 м, залегающей над вторым силлом, температура снизилась на 80°C (без учёта зоны непосредственного контакта).

На глубине 481,9 м в составе пород преобладает гипс (46%), в подчиненном количестве присутствуют: глинистое вещество (20%), доломит (15%), кальцит (3%), кварц (6,2%), рудные минералы (4,5%), УВ (2,8%), лейкоксен (2,5%). Сульфатный материал неоднородно перекристаллизован (от тонко-, до среднекристаллического), кристаллы таблитчатой, шестоватой и неправильной формы (диаметром до 0,42 мм) сильно замутнены включениями пелитоморфного и тонкочешуйчатого глинистого вещества, микролитов рудных минералов, возможно, графитизированного УВ. Кварц присутствует в виде обломков алевроитовой размерности (до 0,08 мм) и в мозаичных агрегатах слагает скелетные остатки организмов - реликты стенок раковин микрофауны и спикул губок. Кремнистое вещество в таких агрегатах, как правило, хорошо раскристаллизовано, микролиты кварца (диаметром до 0,07 мм) с нормальным или волнистым угасанием содержат многочисленные тонкие включения сульфидов железа и УВ, основная часть которых заполняет внутренние полости раковин (рис. 2Б). Доломит от тонко-, до крупнокристаллического (диаметр кристаллов до 0,75 мм) с включениями аналогичными вышеописанным. По внешним признакам можно предполагать метосоматическое замещение этим минералом известковых фаунистических остатков. Разнокристаллический кальцит заполняет трещины (с величиной раскрытия

до 0,4 мм), стенки которых нечёткие, уверенно определяются только после окрашивания породы ализарином. Вероятно, изначально порода содержала значительное количество ОВ, преобразования которого ускорились из-за прогрева толщи интрузией, залегающей выше [7, 8]. Интенсивные выходы газов способствовали росту внутрислоевого давления и созданию условий для формирования аутигенного кварца с большим количеством включений, в отличие от чистого регенерационного кварца, образующегося при региональном литогенезе. Сланцеватость и локальная мраморизация появляются в породах аналогичного состава, залегающих выше на глубине 477,7 м, что свидетельствует о возрастающих температурах и давлении со стороны силла. На данном участке разреза замеры кальцит/доломитовым термометром не проводились. В мраморизованных органогенно-обломочных известняках на глубине 472,8 м температура составила 350°C, в породах сохраняется достаточно высокое содержание непрозрачных компонентов (пирита и УВ) – 5-8%, которые не только образуют пятна неправильной формы, но и заполняют неоднородно расширенные трещины (с величиной раскрытия до 0,12 мм), мелкобугорчато-зубчатые, иногда сутуровидные микро-парастилолиты (толщиной до 0,05 мм). На глубине 467,2 м в отложениях сульфатно-карбонатного состава весь гипс переходит в ангидрит, появляются элементы очковой структуры метаморфических пород. Рост температур до 450°C подтверждается данными кальцит/доломитового термометра на глубине 462,2 м и далее вверх по разрезу до 580°C на глубине 452,2 м. Таким образом, по мере приближения к силлу в разрезе мощностью около 20 м с часто переслаивающимися сульфатными, карбонатными, глинистыми и смешанными породами, температура возросла на 230°C. В известковых прослоях отмечается интенсивная мраморизация с почти полной утратой первичной органогенной структуры, малые количества доломита присутствуют в составе реликтов фаунистических остатков. В существенно глинистых слойках произошла перекристаллизация микро-тонкокristаллического карбонатного и сульфатного материала с образованием кристаллов кальцита совершенных форм (диаметром до 0,08 мм) и игольчатых, хаотично ориентированных кристаллов ангидрита (длиной до 0,15 мм).

Полученные данные свидетельствуют о том, что разрез между интрузиями (верхняя мощностью 43 м, нижняя – 39 м) в изученном интервале разделяется по уровню наименьшей преобразованности пород (глубина 484,8 м, $T=310^{\circ}\text{C}$) на две почти равные части: нижнюю толщиной 31,7 м и верхнюю – 32,6 м (рис. 3). Разность температур для нижней толщи составила 80°C, а для верхней – 270°C. Авторы считают, что величина прогрева осадочных толщ зависит не только от мощности интрузива. Большое значение имеет неоднородность разреза по минеральному составу различных слоёв, их толщине и количеству содержащегося ОВ. Результаты исследования зоны контакта свидетельствуют о возможной графитизации не только углеводородов, но и карбонатного материала [9]. Процесс протекал с увеличением пустотного пространства за счёт потерь при прокаливании и формирования системы трещиноватости, масштабность развития которой оказывала прямое влияние на преобразования пород, в том числе удалённых от интрузии [8 и др.]. Исходя из этого, предлагается в качестве максимальной тем-

пературы контактового метаморфизма, заложенной в физико-химическом обосновании математической модели, использовать температуру разложения карбонатов с учётом давления (895-975°C).

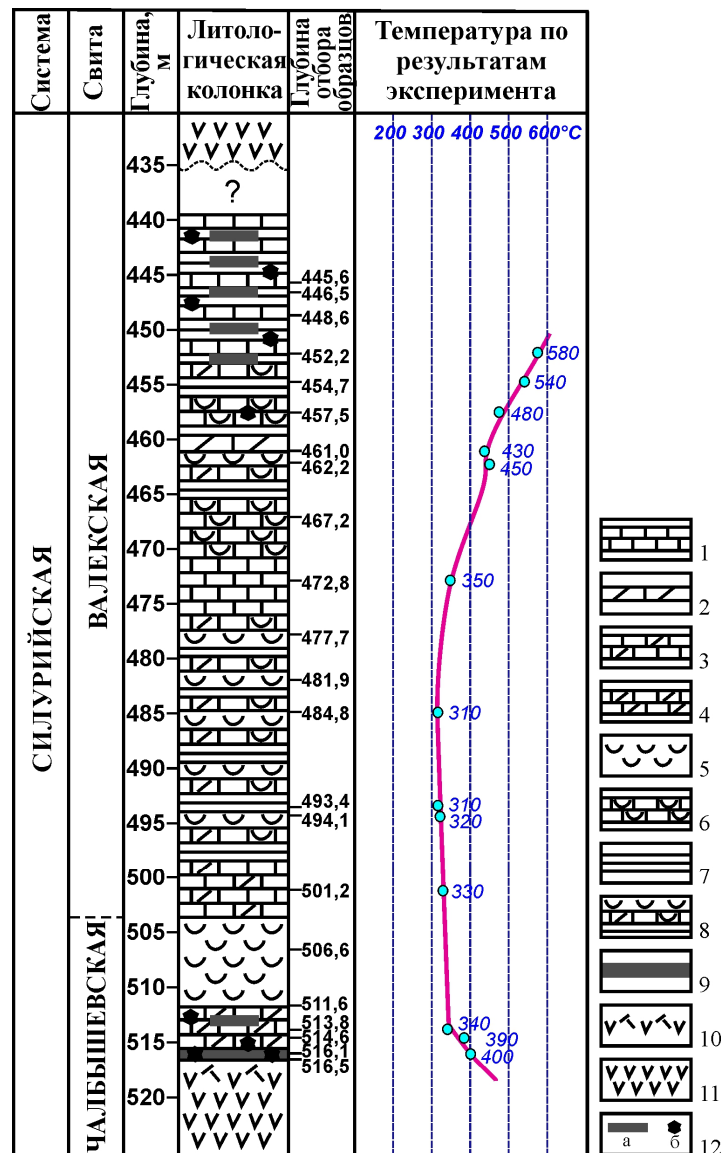


Рис. 3. Литологический разрез, вскрытый скважиной Биробчанская 3, с данными измерений температур кальцит-доломитовым термометром: 1 – известняк, 2 – доломит; 3 – доломитистый известняк, 4 – доломитовый известняк, 5 – гипс/ангидрит, 6 – сульфатно-карбонатная порода, 7 – глинистые прослои, 8 – частое переслаивание глинисто-карбонатно-сульфатных пород с послойными вариациями в содержании основных компонентов, 9 – графитизированная порода, 10 – базальтовый порфирит с реликтовыми участками, выполненными долеритом, 11 – долерит, 12а – графитизированные фрагменты, 12б – рудные минералы в количестве около 5% и более.

Работа выполнена в рамках темы FWZZ-2022-0008 Государственной программы ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конторович А.Э., Павлов А.Л., Хоменко А.В., Третьяков Г.А. Физико-химическое моделирование процессов превращений сульфатно-карбонатных углеводородсодержащих осадочных пород под тепловым воздействием интрузий траппов / Результаты работ по Межведомственной региональной научной программе «Поиск» за 1992-1993 годы. Ч. 1. – Новосибирск, 1995. – С. 155-159.
2. Конторович А.Э., Павлов А.Л., Третьяков Г.А., Хоменко А.В. Физико-химическое моделирование термодинамических равновесий в системе «карбонатно-эвапоритовые породы - вода – углеводороды» при контактовом метаморфизме и катагенезе // Геохимия. – 1996. – № 7. – С. 598-610.
3. Конторович А.Э., Павлов А.Л., Хоменко А.В., Третьяков Г.А. Физико-химические условия графитизации углеводородсодержащих пород (на примере запада Сибирской платформы) // Геохимия. – 1997. – № 6. – С. 563-570.
4. Гордеева А.О., Жидкова Л.В., Хоменко А.В. Влияние интрузий долеритов на нефтегазоносность Южно-Тунгусской нефтегазоносной области // Геология нефти и газа. – 1999. – № 5-6. – С. 34-39.
5. Comodi P., Nazzareni S., Zanazzi P.F., Speziale S. High-pressure behavior of gypsum: A single-crystal X-ray study // American Mineralogist. – 2008. – Vol. 93. – P. 1530-1537.
6. Михеенков М.А. Особенности механической активации гипса в условиях динамического прессования // Исследовано в России. – 2004. – Т. 7. – С. 1342-1352.
7. Tisot P.R. Alterations in structure and physical properties of Green River oil shale by thermal treatment // Journal of chemical and engineering data. – 1967. – Vol. 12. – P. 405-411.
8. Kobchenko M., Panahi H., Renard F., Dysthe D.K., Malthé-Sørenssen A., Mazzini A., Scheibert J., Jamtveit B., Meakin P. 4D imaging of fracturing in organic-rich shales during heating // Journal of Geophysical Research: Solid Earth – 2011. – Vol. 116(B12). – P. 10-29.
9. Oganov A.R., Hemley R.J., Hazen R.M., Jones A.P. Structure, bonding, and mineralogy of carbon at extreme conditions // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2013. – Vol. 75. – P. 47-77.

© А. О. Гордеева, О. Н. Злобина, 2022