



Е.Е. Оксенойд
НАЦ РН им. В.И. Шпильмана¹
заведующий лабораторией геологии
баженовско-абалакского
нефтегазоносного комплекса
oksenojd@crru.ru



И.В. Козлов
НАЦ РН им. В.И. Шпильмана²
старший научный сотрудник
лаборатории исследования керна и
шлама
Kozloviv@nacn.hmao.ru



Р.И. Баширов
НАЦ РН им. В.И. Шпильмана¹
инженер лаборатории баженовско-
абалакского нефтегазоносного
комплекса
bashirustam@gmail.com

Минерально-вещественный состав и фильтрационно-емкостные свойства баженовских пород в центральной части Западной Сибири

¹Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана. Россия, 625026, Тюмень, ул. Малыгина 75, а/я 286.

²Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана. Россия, 628007, Ханты-Мансийск, улица Студенческая, 2.

По выборке из более 3000 образцов по 200 скважинам, пробуренным на территории ХМАО-Югры, установлены классы (литотипы) пород по классификации, предложенной ИНГГ СО РАН. Больше половины образцов представлено микститами (породами смешанного состава), около трети составляют существенно кремнистые разности (силициты), совместная доля аргиллитов и карбонатов не достигает 10%. Для 200 образцов керна определены пористость и газопроницаемость до и после экстракции. Проведено сопоставление классов пород баженовской свиты с их фильтрационно-емкостными свойствами и индексом нефтенасыщения по пиролитическим данным. Представлена методика по определению емкости баженовских пород

Ключевые слова: баженовская свита; минерально-вещественный состав; литотипы; пористость; проницаемость; индекс нефтенасыщения; Западная Сибирь

Определение минерально-вещественного состава имеет важное практическое значение для подсчета запасов нефти в баженовских породах. Во «Временном методическом руководстве по подсчету запасов нефти в трещинных и трещинно-поровых коллекторах в отложениях баженовской толщи Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции» [1] рекомендуется оценивать нефтенасыщенную толщину «на основе литотипизации». Также в документе регламентируются «методы определения пористости низкопроницаемых, трещиноватых и кавернозных коллекторов».

В НАЦ РН им. В.И. Шпильмана изучение баженовской свиты активно ведется с 2012 г. Полученные результаты исследований неоднократно освещались в материалах конференции «Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа – Югры», демонстрировались на совещаниях различного уровня. В данной статье авторы представляют как некоторые новые экспериментальные данные по фильтрационно-емкостным свойствам баженовских отложений, так и результаты анализа имеющихся определений минерально-вещественного состава, выполненных на иной методической основе. Существенной особенностью предлагаемых вниманию материалов является то, что информация не ограничена рамками одного месторождения или района, а охватывает практически всю территорию развития высокоуглеродистых пород баженовского горизонта в границах ХМАО-Югры.

Минерально-вещественный состав баженовских пород

Для анализа минерально-вещественного состава использовались результаты геохимических, минералогических и петрографических исследований керна из базы данных НАЦ РН им. В.И. Шпильмана. Анализы выполнены в специализированных лабораториях: пиролитические – в ТомскНИПИнефть (И.В. Гончаров) и ВНИГНИ (М.В. Дахнова); петрографические и минералогические исследования (рентгеноструктурный (РСА) и рентгенофлуоресцентный (РФА) анализы в Институте геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН (К.С. Иванов, Ю.В. Щапова, Н.В. Вахрушева), Институте минералогии УрО РАН (П.В. Хворов). Часть данных была получена в виде картотеки от ЗапСибИПГНГ (А.В. Рыльков, И.Н. Ушатинский, Ю.В. Брадучан) и представляет собой систематизацию выполненных ранее в ЗапСибНИГНИ литогеохимических и геохимических исследований.

Анализировалась выборка из более 3000 образцов по 200 скважинам. Около половины образцов было охарактеризовано лишь данными РФА и содержанием органического углерода ($C_{орг}$ или ТОС).

Для расчета минерально-вещественного состава использовались данные рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцентного анализов. Рентгеноструктурный анализ дает информацию о соотношении основных минеральных фаз. Рентгенофлуоресцентный анализ позволяет измерять концентрации основных порообразующих элементов. Оба эти метода не позволяют охарактеризовать содержание твердого органического вещества, поэтому используется параметр $C_{орг}$.

В результате рентгенофазового минерального анализа образцов баженовских отложений получены соотношения содержаний минералов, среди которых основными являются следующие: кварц, плагиоклаз (альбит), глинистые минералы, кальцит, доломит, пирит. Необходимо отметить, что данные содержания минералов определяются без учета органического вещества, аморфных агрегатов и тех глинистых минералов, которые не дают четких пиков.

Первым этапом расчета минерально-вещественного состава является расчет содержания керогена по величине $C_{орг}$. Чтобы определить содержание в породе керогена, необходимо знать степень катагенеза, которую обычно характеризуют по величине отражательной способности витринита (R_0).

Для определения коэффициента пересчета содержания органического углерода в концентрацию органического вещества (ОВ) использовалась карта изореспленд витринита (R_0), приведенных к верхней части баженовского горизонта, построенная в ИНГГ СО РАН. Все рассматриваемые скважины характеризуются значениями R_0 от 0,49% на северо-западе ХМАО-Югры в Шеркалинском мегапрогибе до 1,05% на Верхнесалымском месторождении, что характеризует стадии катагенеза от $МК_1$ до $МК_3$ (по Вассоевичу). Снятому с карты значению R_0 ставилась в соответствие концентрация углерода в органическом веществе согласно схеме соотношения разных характеристик стадий катагенеза. Определенные таким образом доли содержания углерода в ОВ изменяются от 75% до 84%. Соответственно, величина коэффициента пересчета $C_{орг}$ в ОВ составила 1,33–1,19.

На втором этапе проводился пересчет концентраций оксидов, измеренных в результате рентгенофлуоресцентного анализа, в соотношения минеральных фаз. Было определено со-

держание кремнистых, глинистых, карбонатных минералов, альбита и пирита.

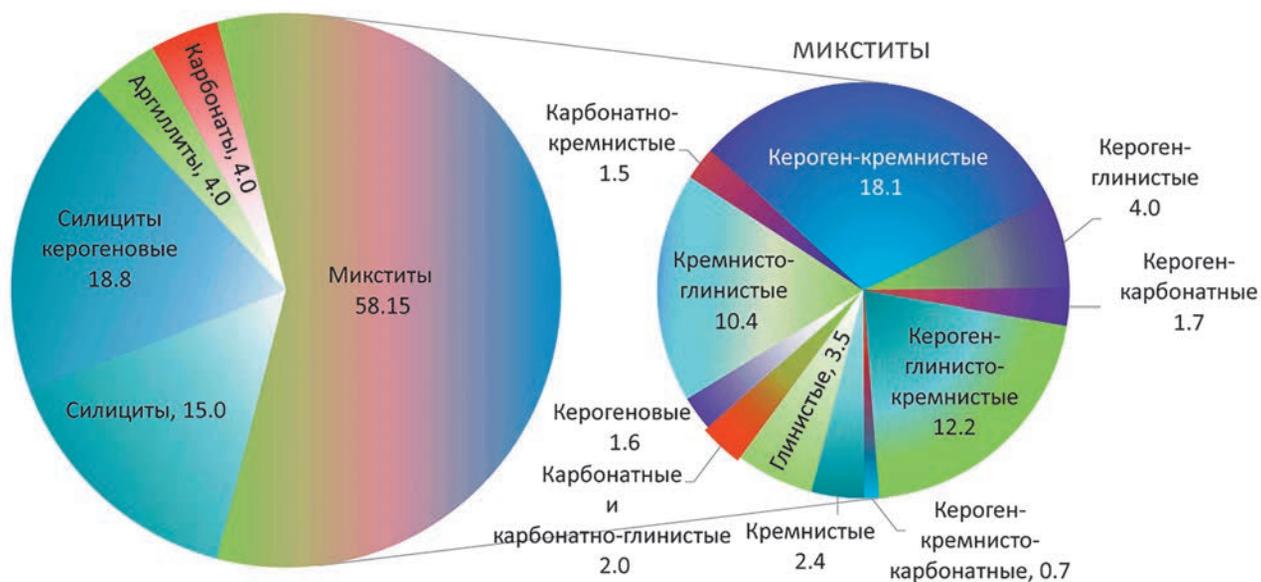
Для проверки полученных содержаний вещественного состава баженовских пород проводилось сравнение результатов расчетов с данными рентгеноструктурного анализа. По выборке из 1896 анализов были проведены попарные сопоставления содержаний глинистого (ГлВ), кремнистого (КрВ), карбонатного (КБВ) вещества, пирита и альбита. Парные регрессии характеризуются высоким уровнем корреляционных связей. Наиболее высокая достоверность аппроксимации у карбонатного вещества $R^2 = 0,88$, у глинистого, кремнистого веществ и альбита $R^2 = 0,85$, $R^2 = 0,83$ и $R^2 = 0,76$, соответственно.

На втором этапе проверки методики расчета минерально-компонентного состава пород были построены графики изменения по глубине содержаний основных компонентов баженовских пород, рассчитанных по РФА и определенных по РСА для нескольких скважин с наиболее представительным выносом керна из разных районов. Исходя из того, что методом РСА невозможно определить количество органического вещества, не обладающего кристаллической структурой, изначально можно было предположить, что содержания, определенные по РСА, будут завышены относительно расчетных значений.

Отмечается хорошая сходимость результатов по трем компонентам: глинистые и карбонатные минералы и альбит. Наблюдаемые в отдельных экстремумах расхождения массовых концентраций не превышают 5%.

Рис. 1.

Распределения встречаемости классов и подклассов пород в баженовских отложениях



Ожидаемое завышение значений РСА над расчетными содержаниями проявляется на диаграммах минералов группы кремнезема (до 10%) и пирита (до 5%). Величина завышения для пирита коррелируется с содержанием органического вещества: минимальна в средней части свиты, там, где содержание ОВ не превышает 10%.

Проведенное сопоставление данных РСА и расчетных данных позволяет использовать полученные значения содержаний основных вещественных компонентов баженовской толщи для дальнейшего анализа особенностей состава изучаемых отложений.

Построены гистограммы распределений содержаний основных породообразующих компонентов БС: кремнистого (КрВ), глинистого (ГлВ), органического, карбонатного веществ (КБВ), пирита и альбита. Для распределений всех компонентов, кроме КБВ, средние значения и медианы практически совпадают и составляют: 42–43% (КрВ), 22–21% (ГлВ), 13–12% (ОВ), 7% (альбит), 7–6% (пирит), соответственно. Что касается карбонатного вещества, то хотя для 60% разностей содержание КБВ < 5%, в то же время встречаются отдельные образцы с очень высоким его содержанием. Этим объясняется тот факт, что средняя карбонатность выборки составляет 9,8%.

К представленной выборке более чем из 3000 проб была применена классификация пород баженовской свиты по соотношению четырех породообразующих компонентов: кремнистого, глинистого, карбонатного и органического веществ, предложенная А.Э. Конторовичем с соавторами [2].

Для деления пород на классы и подклассы были выбраны граничные значения концентраций: 25% и 50% для минеральных фаз и 10% для органического вещества. Выделены классы «чистых» разностей: силициты, аргиллиты и карбонаты (с содержанием соответствующих минералов более 50%) и микститы (содержание ни одного из компонентов не достигает 50%). В классах обособлены подклассы. Полученное распределение встречаемости классов и подклассов пород представлено на **рис. 1**. Силициты и карбонаты подразделяются по содержанию керогена: больше 10% – силициты керогеновые и карбонаты керогеновые, встречаемость которых составляет 18,8% и 0,3%, соответственно. При содержании керогена менее 10% литотипы обозначаются «собственно» силициты и «собственно» карбонаты, с встречаемостью 15% и 3,7%, соответственно. Аргиллиты представлены подклассами «собственно» аргиллитов (встречаемость 2,1%) и аргиллитов кремнистых (1,9%) с разделением по содержанию кремнистых минералов < 25% и > 25%, соответственно.

По количеству преобладающих групп минералов с содержанием 25–50% и керогена > 10% выделяются микститы однокомпонентные

(кремнистые, глинистые, карбонатные), двухкомпонентные (карбонатно-глинистые, кремнисто-глинистые, карбонатно-кремнистые, кероген-кремнистые, кероген-глинистые) и трехкомпонентные (кероген-глинисто-кремнистые и кероген-кремнисто-карбонатные). Две трети проб этого класса относятся к трем подклассам: кремнисто-глинистые (10,4%), кероген-кремнистые (18,1%) и кероген-глинисто-кремнистые (12,2%).

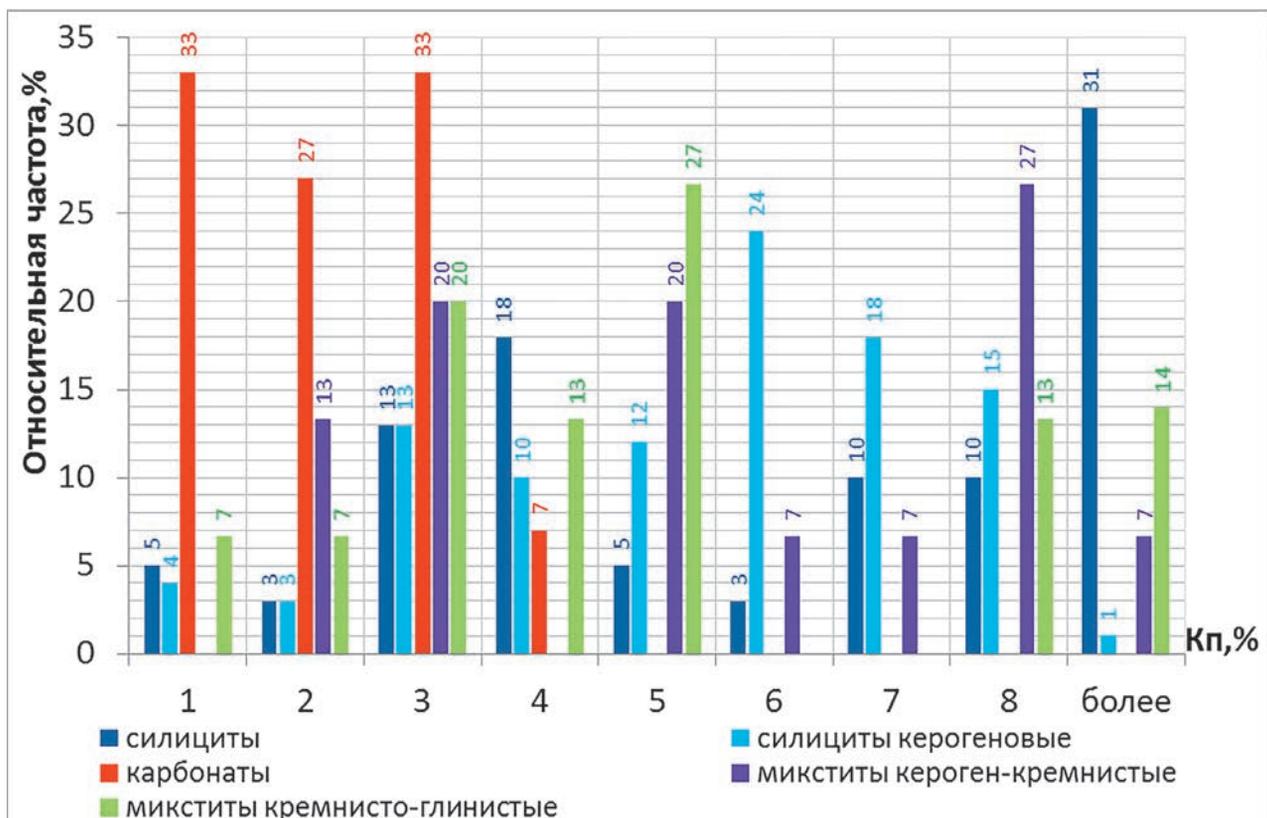
Диаграмма демонстрирует, что в баженовских отложениях преобладают микститы – породы смешанного состава, около трети составляют существенно кремнистые разности – силициты. На долю аргиллитов и карбонатов приходится менее 10% выборки.

Фильтрационно-емкостные свойства баженовских пород

Для определения ФЕС различных литотипов было отобрано 192 цилиндрических образца керна диаметром 30 мм по 22 скважинам, пробуренным с 1998 по 2007 гг.

Классовый состав выборки оказался отличным от полученного ранее распределения: преобладают силициты керогеновые (37%) и собственно силициты (26%), затем идут поровну по 8%: микститы кероген-кремнистые, кремнисто-глинистые и карбонаты, т.е. преимущественно крепкие монолитные разности. Это объясняется

Рис. 2.
Распределение значений открытой пористости литотипов БС после экстракции



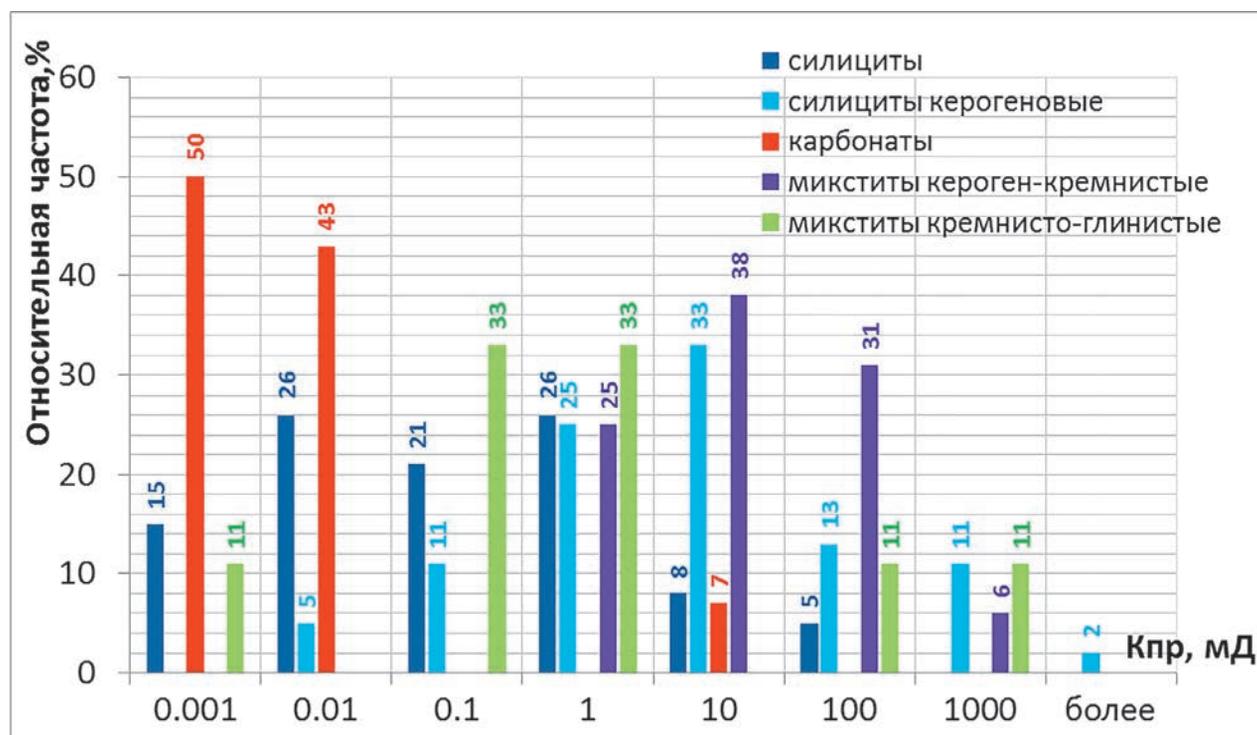
невозможностью изготовления цилиндрических образцов из неоднородных слоистых трещиноватых пород.

Определение открытой пористости и кажущейся минералогической плотности газоволюметрическим методом (насыщение гелием) и определение абсолютной газопроницаемости (фильтрацией азота) проводились дважды: сразу после отбора образцов и после экстракции.

Экстракцию проводили стандартным способом в аппаратах Сокслета спиртобезольной смесью до исчезновения окраски раствора. В случае, если по прошествии этого срока экстракционный раствор имел видимую окраску, растворитель заменялся на толуол и образцы зерна доводились экстракцией толуолом. После полной очистки образцы и пробы высушивались до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре +80 °С.

Необходимо отметить, что экстрагирование пород баженовской свиты довольно длительный процесс (несколько месяцев) вследствие их низкой проницаемости. После экстрагирования в ряде образцов произошло раскрытие вертикальных и горизонтальных микротрещин (особенно сильно – в микститах кремнисто-глинистых), некоторые образцы утратили правильную геометрическую форму и измерение газопроницаемости на них не проводилось.

Рис. 3.
Распределение значений проницаемости литотипов БС после экстракции



Сопоставим коэффициенты пористости (K_p) до экстракции для литотипов, которые представлены более чем 10 образцами: это силициты (35), силициты керогеновые (58) и микститы кероген-кремнистые (13). Средние значения составляют 4,6%, 0,2% и 0,3%, соответственно. Для силицитов более чем для половины образцов K_p не превышает 6%, в то же время треть образцов характеризуется пористостью от 8,2 до 11,5%. Что касается силицитов керогеновых и микститов кероген-кремнистых, то значением параметра менее 1% характеризуются 93% и 85% образцов соответствующих литотипов.

Средние значения проницаемости ($K_{пр}$) до экстракции для названных классов пород составили 0,1 мД, 1,8 мД и 0,2 мД, соответственно. Для обоих подклассов силицитов для половины образцов проницаемость составляет менее 0,001 мД. Доли образцов с проницаемостью более 0,1 мД составляют: 9% (силициты), 20% (силициты керогеновые) и 14% (микститы кероген-кремнистые).

После экстракции определения проводились на большем числе образцов: силициты (48), силициты керогеновые (70), карбонаты (15) и микститы кероген-кремнистые (15) и кремнисто-глинистые (15).

Средние величины пористости после экстракции для анализируемых групп составляют 6,3%, 5%, 1,6%, 5% и 5,4%, соответственно. Доля силицитов с K_p больше 10% выросла с 6% (до экстракции) до 22% после экстракции, максимальное значение пористости составило 15%. Что касает-

ся силицитов керогеновых, то более половины характеризуются после экстракции пористостью 5–8%. Наиболее низкая пористость после экстракции у карбонатов: для двух третей K_n меньше 2%, максимальное значение параметра 3,7%. Величина пористости после экстракции составляет 5–8% для половины образцов подкласса силицитов керогеновых и 4–8% для двух третей микститов кероген-кремнистых (рис. 2).

Средние значения проницаемости для названных классов пород после экстракции составили 1,9 мД, 61,1 мД и 18,3 мД, соответственно, т.е. увеличились на порядок. Экстракция в разной степени повлияла на проницаемость разных литотипов. Менее всего, как и следовало ожидать, изменилась проницаемость силицитов: 41% образцов характеризуются K_{np} менее 0,01 мД (до экстракции таких было 72%), для 13% образцов $K_{np} > 1$ мД (было 6%). Проницаемость пород с содержанием керогена > 10% изменилась более значительно. Значениями K_{np} в диапазоне 0,1–10 мД характеризуются примерно половина (силициты керогеновые) и две трети (микститы кероген-кремнистые) образцов в соответствующих подклассах (рис. 3).

Если рассматривать K_n и K_{np} как критерии для выделения коллектора, то используя терминологию «светофора» [1], следует, вероятно, к «зеленому» классу кроме силицитов и силицитов керогеновых отнести микститы кероген-кремнистые.

Построены кроссплоты пористости и проницаемости до и после экстракции. До экстракции

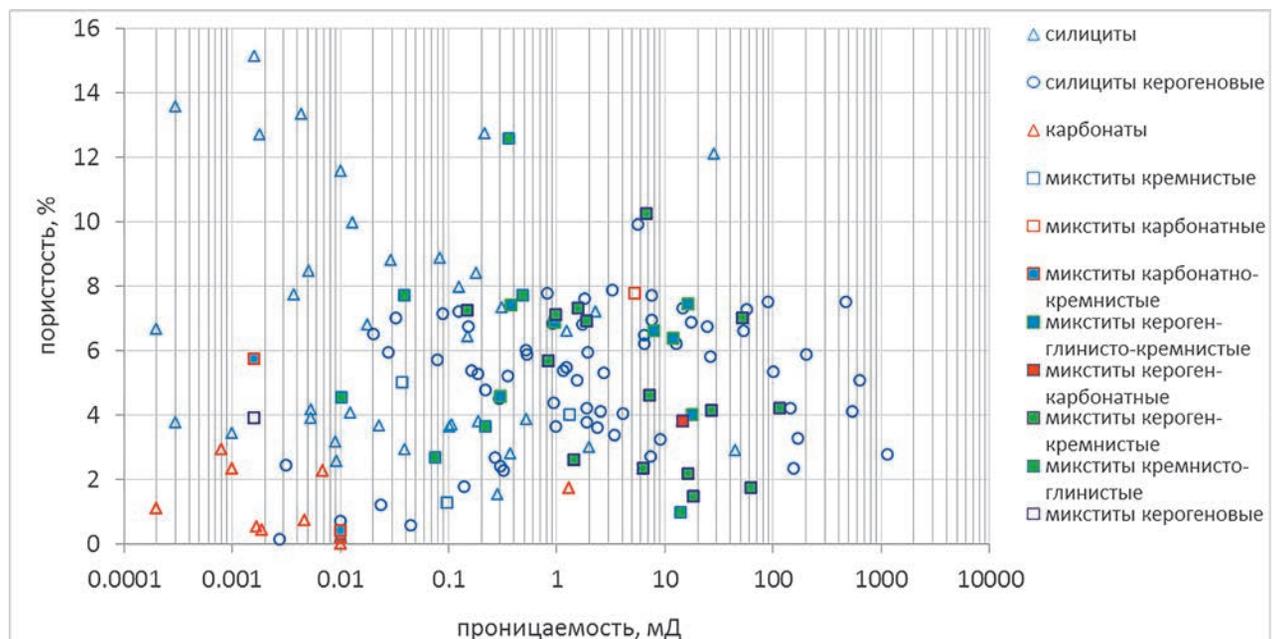
две трети образцов характеризуются значениями $K_n < 0,5\%$, выделяется лишь небольшая группа силицитов с пористостью 5–11%. Для половины образцов $K_{np} < 0,001$ мД, еще для трети < 0,1 мД.

После экстракции (рис. 4) наиболее характерным диапазоном, куда попадает треть исследуемых образцов, является пористость $2\% < K_n < 8\%$ и проницаемость $0,1 \text{ мД} < K_{np} < 10 \text{ мД}$, из литотипов преобладают силициты керогеновые. Можно выделить еще две области: минимальных значений пористости и проницаемости $0\% < K_n < 4\%$ и $0,0001 \text{ мД} < K_{np} < 0,01 \text{ мД}$, в которой преобладают силициты и карбонаты, и область с высокой пористостью (более 8%) и низкой проницаемостью (менее 0,1 мД), представленной силицитами.

Несмотря на полученные низкие фильтрационные свойства большей части карбонатных образцов керна, не следует делать вывод о том, что карбонаты являются абсолютно непроницаемыми разностями. Измерение газопроницаемости на цилиндрических образцах керна не позволяет охарактеризовать первичные макро- и микротрещины в породе. То есть, фактически, специфика применяемого метода исследований обуславливает получение низких величин матричной пористости и проницаемости породы, в то время как для карбонатов проницаемость определяется, преимущественно, трещиноватостью.

На рис. 5 представлено сопоставление значений пиролитических параметров S_1 и ТОС.

Рис. 4. Сопоставление пористости и проницаемости литотипов БС после экстракции



Параметр S_1 отражает количество свободных жидких и газообразных углеводородов в исследуемой породе. Не все содержащиеся в породе свободные УВ являются подвижными, поскольку часть их удерживается сорбционными процессами. Для выделения в разрезе скважины интервалов с подвижными УВ используется соотношение S_1/TOC , поскольку существует эмпирическая оценка индекса нефтенасыщения (*oil saturation index*) $S_1 \times 100/TOC$, согласно которой значение индекса > 100 может свидетельствовать о наличии потенциально извлекаемой нефти [3].

На **рис. 5** точки со значением индекса нефтенасыщения > 100 располагаются над пунктирной прямой. В эту область попадает большинство силицитов, часть силицитов керогеновых, все микститы кероген-карбонатные, а также некоторые образцы из микститов кремнистых, кремнисто-глинистых и др.

Таким образом, с точки зрения индекса нефтенасыщения наиболее перспективными для получения нефти являются силициты.

Рекомендации по определению емкости баженовских пород

Определение пористости неэкстрагированных образцов керна фактически дает только представление о количестве флюида, которое было утрачено из образца керна, после его извлечения из скважины. Получаемая величина зависит как от режима подъема и разгазирования керна,

так и от условий и продолжительности хранения ядерного материала. Таким образом, этот параметр может использоваться для корректировки величины запасов.

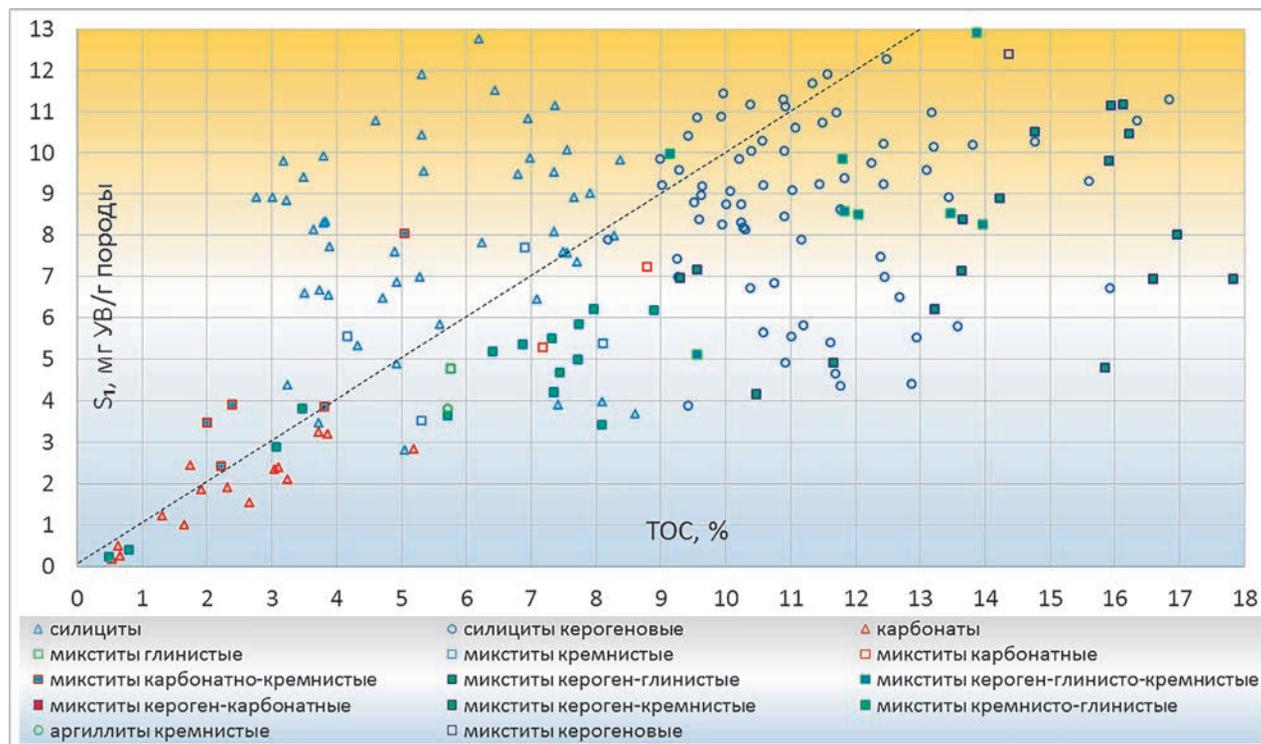
Для определения открытой, закрытой и занятой битумоидами емкости породы предлагается методика, разработанная в НАЦ РН им. В.И. Шпилемана.

На первом этапе образцы керна распределяются по литотипам.

Для силицитов, карбонатов и неглинистых подклассов микститов открытая пористость, не занятая битумом, а также первоначальные объемная и кажущаяся минералогическая плотности определяются по методу Преображенского в соответствии с ГОСТ 26450.1-85. Аргиллитам и микститам с повышенной глинистостью (25–50%) придается правильная геометрическая форма, далее измеряется пористость и плотности газовольюметрическим методом. В случае, если образцу невозможно придать правильную геометрическую форму (разрушение образца, техническая невозможность обработки хрупкого материала) применяется метод парафинирования.

Образцы сушатся до постоянной массы и экстрагируются. После этого образцы высушиваются до постоянной массы в вакуумном сушильном шкафу, измеряется их минералогическая плотность в газовом пикнометре, рассчитывается открытая пористость занятая битумоидами.

Рис. 5. Сопоставление пиролитических параметров S_1 и TOC



Далее образцы измельчаются до размеров частиц < 100 мкм, размер контролируется просеиванием через сито с соответствующим размером ячеек. После измельчения образцы дополнительно экстрагируются и высушиваются до постоянной массы. Производится повторное измерение минералогической плотности, аналогичное предыдущему, в результате получается плотность экстрагированного порошка с керогеном и значение закрытой пористости.

Выводы

В баженовских отложениях преобладают микститы – породы смешанного состава, около трети составляют существенно кремнистые разновидности – силициты. На долю аргиллитов и карбонатов вкуче приходится менее 10% выборки.

Основными породообразующими компонентами являются кремнистое, глинистое и органическое вещество, для которых средние и медианные значения содержаний превышают 40%, 20% и 10%, соответственно.

Осознавая недостаточную представительность выборки образцов с определениями фильтрационно-емкостных свойств, тем не менее, можно отметить, что относительно повышенными ФЕС выделяются силициты и микститы кероген-кремнистые. Комплексообразование петрофизических данных с пиролитическими обуславливает выделение в качестве наиболее перспективных источников получения притоков «собственно» силицитов.

Предложена методика для определения открытой, закрытой и занятой битумоидами емкости породы. ❷

Литература

1. Временное методическое руководство по подсчету запасов нефти в трещинных и трещинно-поровых коллекторах в отложениях баженовской толщи Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Недропользование XXI век. 2017. № 4. С. 68–101.
2. Конторович А.Э., Ян П.А., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Эдер В.Г. Классификация пород баженовской свиты // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 11. С. 2034–2043.
3. Jarvie, D. M., 2012, Shale resource systems for oil and gas: Part 2 – Shale-oil resource systems, in J. A. Breyer, ed., Shale reservoirs – Giant resources for the 21st century: AAPG Memoir 97, p. 89–119.

UDC 552.5/553.983:550.8.02(550.8.05)

E.E. Oksenoyd, Head of the Laboratory of Geology of the Bazhenovo–Abalak Oil and Gas Bearing Complex, V.I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil¹, oksenoyd@cr.ru

I.V. Kozlov, Senior researcher of the Laboratory of Core and Cuttings analysis, V.I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil², kozloviv@nacn.hmao.ru

R.I. Bashirov, Engineer of the Laboratory of Geology of the Bazhenovo–Abalak Oil and Gas Bearing Complex¹, V.I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil¹, bashirustam@gmail.com

¹PO box 286, 75 Malygin street, Tyumen, 625026, Russia

²2 Studencheskaya street, Khanty–Mansiysk, 628007, Russia

Mineral and Matter Composition and Reservoir Properties of Bazhen Rocks in the Central Part of the West Siberia

Abstract. Based on the results of mineralogical and chemical analyses of more than 3000 core samples from 200 wells drilled within the Bazhenov Formation in the central part of the West Siberian basin classes and subclasses of rocks (lythotypes) are identified using classification developed by IPGG SB RAS. More than a half of samples is presented by mixtites (rocks of mixed composition), silicites make about a third and the joint share of claystones and carbonates doesn't reach 10%. For 200 core samples the porosity and gas permeability are defined before and after extraction. Comparison of rock classes of the Bazhenov Formation to their porosity & permeability properties and the oil saturation index (OSI) is carried out. The method for determining of storage capacity of Bazhen rocks is presented.

Keywords: Bazhenov formation; mineral and matter composition; lythotypes; porosity; permeability; oil saturation index; West Siberia

References

1. Vremennoe metodicheskoe rukovodstvo po podschetu zapasov nefiti v treshchinnykh i treshchinno-porovykh kollektorakh v otlozheniakh bazhenovskoi tolshchi Zapadno-Sibirskoi neftegazonosnoi provintsii [Temporary methodological guidance on the calculation of oil reserves in fractured and fissured-porous reservoirs in the sediments of the Bazhenovian sequence of the West Siberian oil and gas province]. Nedropol'zovanie XXI vek [Subsoil use of the XXI century], 2017, no. 4, pp. 68–101.
2. Kontorovich A.E., Yan P.A., Zamirailova A.G., Kostyreva E.A., Eder V.G. Klassifikatsiia porod bazhenovskoi svity [Classification of the rocks of the Bazhenov suite]. Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics], 2016, vol. 57, no. 11, pp. 2034–2043.
3. Jarvie, D. M., 2012, Shale resource systems for oil and gas: Part 2 – Shale-oil resource systems, in J. A. Breyer, ed., Shale reservoirs – Giant resources for the 21st century: AAPG Memoir 97, p. 89–119.