Сведения об авторе

Олейник Елена Владимировна, заведующий лабораторией геологии неокомских отложений, Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В. И. Шпилмана, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)621868, e-mail: oleynik@crru.ru

Information about the author

Oleynik E. V., Head of the Laboratory of Geology of Neocomian Sediments, V. I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil, Tyumen, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)621868, e-mail: oleynik@crru.ru

УДК 553.981.2:552.08

НЕТРАДИЦИОННЫЙ КОЛЛЕКТОР НИЖНЕБЕРЕЗОВСКОЙ ПОДСВИТЫ И КРИТЕРИИ ЕГО ВЫДЕЛЕНИЯ
NON-TRADITIONAL RESERVOIR OF THE LOWER-BEREZOVSKAYA SUBFORMATION AND ITS SEARCHING CRITERIA

Д. Б. Родивиллов, П. Н. Кокарев, В. Г. Мамяшев

D. B. Rodivilov, P. N. Kokarev, V. G. Mamyashev

ООО «Газпром геологоразведка», г. Тюмень

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: нижнеберезовская подсвита; глинистая опока; нетрадиционный коллектор; порово-трещинный коллектор
Key words: the Lower-Berezovskaya subformation; argillaceous gaize; non-traditional reservoir; porous fractured reservoir

Газоперспективность отложений нижнеберезовской подсвиты севера Западной Сибири подробно проанализирована в работах [1, 2]. Для ряда районов, имеющих устойчивое падение добычи газа сеноманских залежей, отложения нижнеберезовской подсвиты признаны как возможный источник ее поддержания. В связи с этим необходимы детальные исследования этого относительно нового объекта газодобычи, в первую очередь следует определить характеристики коллектора и критерии его выделения по данным геофизических исследований скважин (ГИС).

В данной работе рассматриваются результаты ГИРС и лабораторного изучения керна двух скважин Медвежьего месторождения Надым-Пур-Тазовского региона. Данные скважины пробурены в период с 2015 по 2016 годы, бурение происходило с применением безводных нефилтрующих растворов на полимерной и углеводородной основах. В скважинах проведен современный расширенный комплекс ГИС, а также целенаправленно отобран и изучен изолированный керн.

Нетрадиционный коллектор нижнеберезовской подсвиты сенона в пределах Надым-Пур-Тазовского региона Западной Сибири представлен опоками, глинистыми в различной степени. В работе [3] подробно описаны результаты лабораторных исследований керна отложений нижнеберезовской подсвиты одного из месторождений Надым-Пур-Тазовского региона.

Исследователи отмечают, что особенностью фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) рассматриваемых коллекторов является низкая проницаемость — менее 1 мД наряду с достаточно высокой общей пористостью — от 24 до 40 %. В глинистых опоках нижнеберезовской подсвиты выделяют три основных типа пустотного пространства: крупные поры биокластов, естественные трещины, а также поры микрокристаллического (также аморфного) кремнезема и глинистых минералов. Причем по результатам ртутной порометрии и адсорбционно-структурного анализа последний тип пустотного пространства представляется наиболее емким и связующим в единое пространство все типы пустот.

Геологический разрез нижнеберезовской подсвиты представляет собой последовательность пластов НБ0, НБ1 и НБ2. По данным рентгеноструктурного анализа

(РСА) глинистые опоки нижеберезовской подсвиты (рис. 1) содержат примерно 30 % алюмосиликатных глин и 65 % кремнезема различной кристаллографии. Отличительной особенностью опок пласта НБ1 является наличие в минеральном составе слабо кристаллической, а зачастую аморфной по своей структуре опал-кристобалит-тридимитовой фазы кремнезема (ОКТ-фаза).

Рис. 1. Минеральный состав пород нижеберезовской подсвиты и кузнецовской свиты по данным РСА: А) — пласт НБ1 нижеберезовской подсвиты; Б) — пласт НБ2 нижеберезовской подсвиты; В) — кузнецовская свита; 1 — монтмориллонит; 2 — гидрослюда; 3 — цеолит; 4 — хлорит; 5 — каолинит; 6 — пирит; 7 — ортоклаз; 8 — альбит; 9 — кварц; 10 — ОКТ-фаза; 11 — кальцит

Породами, подстилающими отложения нижеберезовской подсвиты, являются глины кузнецовской свиты, они также изучены методом РСА. Глинистая составляющая в этих породах доминирует над кремнистой (см. рис. 1). Глины верхней части кузнецовской свиты содержат примерно 50 % глинистых минералов и 40 % кремнезема.

Увеличение глинистости на границе березовской и кузнецовской свит отражается и на показаниях методов ГИС, в частности на кривых спектрометрического гамма-каротажа (СГК). Глинистые породы кузнецовской свиты характеризуются повышенной суммарной радиоактивностью по сравнению с сенонскими отложениями и увеличенным содержанием радиоактивных изотопов тория и калия. Эффект увеличения глинистости отражается на повышении объемной плотности по гамма-гамма плотностному каротажу (ГГК-П) до 2,3 г/см³. Также данная граница подтверждается результатами определения пористости керна, кремнистые глины кузнецовской свиты характеризуются средним значением коэффициента пористости около 0,230 д.ед, в то время как пористость кремнистых пород сенона в среднем составляет около 0,320 д.ед.

Выше по разрезу нижеберезовские отложения перекрываются глинами верхнеберезовской подсвиты. Минеральный состав данных отложений не изучен. Глины верхнеберезовской подсвиты, как и подстилающие глины кузнецовской свиты характеризуются на фоне отложений нижеберезовской подсвиты повышенными показаниями радиоактивности и плотности (достигает 2,26 г/см³).

Определение геологических границ залегания отложений нижеберезовской подсвиты уверенно осуществляется по падению уровня естественной радиоактивности по гамма-каротажу (ГК) на фоне вмещающих глин. Такой подход дополнительно контролировался показаниями методов индукционного каротажного зондирования (ИКЗ) или высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ). Дело в том, что вмещающие глины характеризу-

ются значением УЭС от 1,5 до 2,5 Ом·м, в то время как глинистым опокам нижеберезовской подсвиты характерны значения УЭС, превышающие 3,0 Ом·м. В совокупности показания радиоактивных методов (ГК, ГГК-П) и электрометрии скважин позволяют надежно определить геологические границы нижеберезовской подсвиты.

Выделение коллекторов

Одна из фундаментальных проблем при оценке запасов газа нижеберезовской подсвиты — отсутствие на сегодняшний день однозначного понимания и определения коллектора таких залежей [2]. Это связано с тем, что до настоящего момента, за исключением ограниченных исследований пористости и проницаемости, ФЕС рассматриваемого коллектора почти не были изучены.

Бурение скважин с применением нефилтрирующихся растворов исключает возможность выделения коллекторов по прямым качественным признакам проникновения бурового раствора. Радиальный градиент УЭС по показаниям зондов различной глубинности (ИКЗ, ВИКИЗ) отсутствует. По данным кавернометрии в скважинах фрагментарно отмечается наличие глинистой корки до 2 мм, однако для большей части разреза диаметр скважин максимально приближен к номинальному значению. Наличие или отсутствие корки не коррелируется с другими видами каротажа, в связи с чем не может служить критерием для выделения коллекторов в отложениях нижеберезовской подсвиты.

В условиях отсутствия по разрезу скважин в интервале нижеберезовской подсвиты явных прямых качественных признаков нами были реализованы статистический и корреляционный способы определения косвенных количественных критериев выделения коллекторов.

Статистический способ. Испытания разреза нижеберезовской подсвиты проводились с применением аппаратуры гидродинамического каротажа (прибор серии MFT компании Weatherford). Всего по двум скважинам проведено 57 опробований, 29 из которых выявили подвижность флюида. Помимо того, проведено два опробования интервала нижележащей кузнецовской свиты, результаты показали отсутствие подвижности флюида в кремнистых глинах.

В целях реализации статистического способа выделения коллекторов, на основе результатов исследований прибором гидродинамического каротажа (ГДК), все объекты испытаний были разделены на две статистические выборки: «проницаемые» и «непроницаемые» породы. Статистическая обработка реализовывалась путем построения интегральных распределений коэффициента пористости $Kп$, определенного по ГГК-П с учетом влияния газа. Полученное в результате статистического анализа (рис. 2) граничное значение $Kп$ равно 0,341 д.ед. имеет достаточно низкую (около 40 %) достоверность. Применение прочих геофизических характеристик, таких как двойной разностный параметр ГК или водородосодержание по нейтронному каротажу (НК), показывает еще меньшую эффективность разделения пород на «проницаемые» и «непроницаемые».

Рис. 2. Интегральные распределения коэффициента пористости по двум выборкам по результатам гидродинамического каротажа

В результате установлено, что в условиях низкопроницаемого коллектора со сложным по структуре пустотным пространством, в котором преобладают поры субкапиллярного размера, отсутствие подвижности флюида по данным ГДК не является достаточным основанием для отнесения пласта к неколлектору. Как итог, статистический способ показал себя недостаточно надежным методом выделения интервалов коллекторов в разрезе нижеберезовской подсвиты.

Корреляционный способ. В основе данного способа лежит анализ ФЕС пород нижеберезовской подсвиты. Отбор изолированного керна позволил определить естественную водонасыщенность ($Kв$) образцов глинистых опок экстракционно-дистилляционным методом (ЭДМ). Образцы, участвующие в специальных исследованиях, представляют собой коллекцию изолированного керна двух скважин, целенаправленно и равномерно отобранную по всей толще нижеберезовской подсвиты. Всего коллекция состоит из 56 образцов, 52 из которых отобраны из керна отложений нижеберезовской подсвиты и 4 образца — из кузнецовской свиты.

Глинистые опок нижеберезовской подсвиты характеризуются значениями коэффициентов $Kп$ от 0,263 до 0,387 д.ед. и в среднем составляет 0,323 д.ед., $Kв$ — от 0,310 до 0,885 д.ед. и в среднем составляет 0,625 д.ед.

Кремнистые глины кузнецовской свиты характеризуются значениями коэффициентов $Kп$ от 0,223 до 0,24 д.ед. и в среднем составляет 0,231 д.ед., $Kв$ — от 0,799 до 0,826 д.ед. и в среднем составляет 0,812 д.ед.

В классическом варианте корреляционный способ определения критериев коллектора основан на построении взаимосвязи коэффициентов общей и эффективной пористости [4]. В нашем случае капилляриметрические исследования с целью определения $Kво$ на предварительно экстрагированных и высушенных образцах были неудачны. Сухие образцы при насыщении их моделью пластовой воды почти моментально разрушаются, что связано с набуханием кластера глинистых минералов монтмориллонитового ряда. Изучаемые опок характеризуются достаточно высокой глинистостью, в среднем составляющей примерно 28 % [3].

По результатам многочисленных испытаний в закрытом стволе скважин притоков пластовой воды в интервале нижеберезовской подсвиты не зафиксировано. Другими словами, на данном этапе изученности коллектора этих отложений с определенной долей условности можно заявить, что общая естественная водонасыщенность, определенная на изолированном керне, является достаточно точной.

С учетом этого, коэффициент эффективной пористости $Kп.эф$ рассчитывается по формуле

$$Kп.эф = Kп \cdot (1 - Kв),$$

где $Kв$ — коэффициент общей водонасыщенности, определенный с помощью ЭДМ.

На рисунке 3 продемонстрировано сопоставление коэффициентов эффективной и общей пористости, черными точками представлены образцы керна нижеберезовской подсвиты, кружками — кузнецовской свиты.

Рис. 3. Сопоставление коэффициента эффективной пористости с коэффициентом открытой пористости в атмосферных условиях

Из представленного на рисунке сопоставления следует, что корреляционная связь между эффективной и общей пористостью отсутствует.

Согласно определению, коллектором углеводородов называют горную породу, способную вмещать нефть, газ или воду и отдавать их при разработке в любых, даже незначительных количествах [4].

Исходя из результатов анализа изолированного керна, представленных на рисунке (см. рис. 3), можно сделать вывод, что первое условие коллектора свойственно для всей коллекции образцов, в том числе и для кремнистых глин верхней части кузнецовской свиты. Наличие эффективной пористости не противоречит ранее отмеченным газопроявлениям при бурении глин кузнецовской свиты, естественно, эти газопроявления менее интенсивны, чем из интервала отложений нижеберезовской подсвиты [5].

Успешные результаты многочисленных испытаний [1, 2, 5] всей толщи нижеберезовской подсвиты доказывают второе условие коллектора относительно данных отложений — способность отдавать углеводороды. Это условие, возможно, выполнимо и для кремнистых глин верхней части кузнецовской свиты, но только в случае применения методов технологического воздействия на пласт. Однако даже тогда получение значимых дебитов из отложений кузнецовской свиты маловероятно.

Другими словами, формально коллектором можно считать как глинистые ополки нижеберезовской подсвиты, так и кремнистые глины кузнецовской свиты. Однако на данном этапе изучения этих пород следует принять кремнистые глины верхней части кузнецовской свиты как неколлектор, а в качестве количественных критериев выделения коллекторов принять их максимальные ФЕС равные 0,250 д.ед. для Kn и 0,050 д.ед. для $Kn.эф$. Область неколлектора, ограниченная этими величинами, представлена серым фоном (см. рис. 3).

Следует отметить, что изолирование керна проходило в атмосферных условиях на устье скважины. Соответственно, необходимо учесть относительное завышение $Kn.эф$ в результате объемного расширения керна. Уравнение, позволяющее привести значения $Kn.эф$ к термобарическим условиям (В. Г. Мамяшев, 2002 г.), имеет вид

$$Kn.эф(пл. усл.) = Kn \cdot \left(\beta - K_v \cdot \left(\frac{1 - \beta \cdot Kn}{1 - Kn} \right) \right),$$

где β — коэффициент объемной сжимаемости, численно равный в данном случае 0,97. Данный параметр установлен по результатам исследования керна в пластовых условиях при эффективном давлении 11,2 мПа и температуре 25 °С. Коэффициент β определяется по формуле

$$\beta = Kn(пл. усл.) / Kn.$$

На рисунке 4 представлено сопоставление значений коэффициентов эффективной и общей пористости, приведенных к термобарическим условиям, графический шифр соответствуют рисунку (см. рис. 3). Как видно из рисунка, граничные значения ФЕС коллекторов в случае введения поправки становятся меньше и составляют

Рис. 4. Сопоставление коэффициента эффективной пористости с коэффициентом открытой пористости в пластовых условиях

0,240 д.ед. для $Kп$ и 0,038 д.ед. для $Kп.эф.$ Область неколлектора, ограниченная этими величинами, представлена серым фоном (см. рис. 4).

Конечно, коллекция образцов изолированного керна является ограниченной. Изолированный керн не отобран из интервала покрывающей верхнеберезовской глинистой толщи. Однако эти отложения изучены в ходе рутинных петрофизических исследований на неизолированном керна. На рисунке 5 представлен график сопоставления коэффициентов проницаемости и пористости для коллекции образцов четырех скважин, участвующих в стандартных лабораторных исследованиях. Черными кружками на рисунке обозначены образцы из кузнецовской свиты, треугольниками — из верхнеберезовской, ромбиками — из нижнеберезовской подсвиты. Также представлены линиями схематичные границы значений для рассматриваемых отложений.

Рис. 5. Сопоставление коэффициента проницаемости с коэффициентом открытой пористости по результатам исследований керна

Из рисунка следует, что глины верхнеберезовской подсвиты имеют большую пористость и меньшую проницаемость в сравнении с отложениями верхней части кузнецовской свиты (см. рис. 5). Несмотря на свою достаточно высокую пористость, которая выше ранее определенного граничного значения $Kп$ равного 0,250 д.ед., верхнеберезовские глины являются региональной покрывкой газовых залежей нижнеберезовской подсвиты и с достаточной степенью уверенностью могут называться неколлектором с прогнозируемой эффективной пористостью менее 0,050 д.ед.

Что же касается глинистых опок нижнеберезовской подсвиты, то в основном образцы керна этих отложений имеют свойства выше установленных граничных значений. По материалам ГИС возможно выделить редкие прослои карбонатизированных плотных пород, которые можно считать неколлектором, в общем же случае всю толщу пород нижнеберезовской подсвиты стоит рассматривать как нетрадиционный, низкопроницаемый, высокопористый порово-трещинный коллектор.

Помимо описанного выше эффекта объемного расширения керна, сказывающегося на водонасыщенности образцов глинистых опок, существуют два теоретиче-

ских аспекта, приводящих к возможному завышению $K_{п.эф}$: во-первых, отбор изолированного керна проводился без контроля потери воды в результате дегазации, которая, вероятно, происходила вследствие снижения давления при подъеме керна; во-вторых, развитое субкапиллярное пространство глинистых опок теоретически может быть причиной адсорбции и формирования неподвижного защемленного газа тонкими капиллярами.

Возможность проявления и масштабность этих эффектов требуют отдельного лабораторного изучения, что позволит в дальнейшем более точно определять естественную водонасыщенность образцов изолированного керна.

Выводы

Глинистые опок нижеберезовской подсвиты по результатам разносторонних исследований керна обладают сложным по структуре субкапиллярным пустотным пространством, характеризуются низкой проницаемостью (менее 1 мД), средняя пористость составляет 0,320 д.ед, естественная водонасыщенность — 0,625 д.ед. (газонасыщенность — 0,375 д.ед.).

Определение геологических границ залегания нижеберезовской подсвиты успешно осуществляется по падению на фоне вмещающих глин уровня естественной радиоактивности по ГК в совокупности с применением результатов электрометрии скважин.

Статистический способ, основанный на результатах ГДК, в условиях низкопроницаемых опок показал низкую эффективность в рамках определения граничных значений коллектора.

Корреляционный способ показал отсутствие функциональной связи между эффективной и общей пористостью глинистых опок. При условии, что вмещающие глинистые толщи верхнеберезовской подсвиты и кузнецовской свиты являются неколлектором, определены граничные значения коэффициентов $K_{п}$ и $K_{п.эф}$ равные 0,250 и 0,050 д.ед. соответственно. В пластовых условиях данные значения соответствуют величинам 0,240 и 0,038 д.ед.

Согласно данным критериям, всю толщину глинистых опок нижеберезовской подсвиты, за исключением редких карбонатизированных прослоев, следует считать эффективной.

Библиографический список

1. Перспективы наращивания ресурсной базы газовых месторождений на поздней стадии разработки путем изучения промышленного потенциала нетрадиционных коллекторов надсеноманских отложений / В. В. Черепанов [и др.] // Трудноизвлекаемые и нетрадиционные запасы углеводородов: опыт и прогнозы. Материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Казань, 3–4 сент. 2014 г.). – Казань, 2014. – С. 104–110.
2. Проблемы оценки нефтегазоперспективности отложений нижеберезовской подсвиты севера Западной Сибири / В. В. Черепанов [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 2. – С. 11–26.
3. Дорошенко А. А., Карымова Я. О. Характеристика пустотного пространства опок сенонских отложений севера Западной Сибири // Экспозиция Нефть Газ. – 2017. – № 6 (59). – С. 23–27.
4. Петерсилье В. И., Пороскун В. И., Яценко Г. Г. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом. – Москва — Тверь, 2003. – 258 с.
5. Нетрадиционные газы севера Западной Сибири / В. Л. Бондарев [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 10. – С. 4–16.

Сведения об авторах

Родивиллов Данил Борисович, ведущий геофизик отдела анализа интерпретации данных ГИС, ГТИ, ООО «Газпром геологоразведка», г. Тюмень, тел. 89129267286, e-mail: d.rodivilov@ggr.gazprom.ru

Кокарев Павел Николаевич, начальник отдела анализа интерпретации данных ГИС, ГТИ, ООО «Газпром геологоразведка», г. Тюмень

Мамяшев Венер Галиуллович, к. г.-м. н., доцент кафедры прикладной геофизики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: mamjashevvg@tyuiu.ru

Information about the authors

Rodivilov D. B., Leading Geophysicist at the Department for Analysis of GIS Data Interpretation, GTI, LLC «Gazprom Geologorazvedka», Tyumen, phone: 89129267286, e-mail: d.rodivilov@ggr.gazprom.ru

Kokarev P. N., Head of the Department for Analysis of GIS Data Interpretation, GTI, LLC «Gazprom Geologorazvedka», Tyumen

Mamyashev V. G., Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor at the Department of Applied Geophysics, Industrial University of Tyumen, e-mail: mamjashevvg@tyuiu.ru