

УДК 551

Ван Илин¹

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ И КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА НИЖНЕОРДОВИКСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СВИТЫ МОДЯГОУ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ТАБАМЯО (БАСЕЙН ОРДОС, КНР)

Во впадине Ордос сосредоточены богатые залежи природного газа, угля и нефти, поэтому в настоящее время она является важной минерально-сырьевой и энергетической базой Китая. Среди газовых месторождений, открытых в последние годы в районе моноклинали Йимен, наиболее известны Сулигэ и Табамяо, где залежи газа заключены в карбонатных породах нижнего ордовика. Автором выделено 5 типов коллекторов, приуроченных к древней коре выветривания в ордовикских отложениях.

Ключевые слова: бассейн Ордос, карбонатные породы, нижнеордовикские коллекторы для залежей газа.

Ordos Basin is concentrated rich areas of coal, natural gas and oil. In last years it is becoming an important mineral resource and energy base of China. To the most well-known and good studied gas fields belong Sulige and Tabamiao, where natural gas takes place in carbonate rocks of Early Ordovician time. As the result of an investigation that made by author, there is a definition of five types of reservoirs which lay in the core of weathering of Ordovician carbonate deposits.

Key words: Ordos basin, carbonate rocks of Early Ordovician age, reservoirs of natural gas.

Введение. Ордосский бассейн, расположенный в центральной части Северного Китая, представляет собой огромную асимметричную синклиналию впадину с пологим северным и крутыми южным и западным бортами. На площади около 250 000 км² выделено несколько крупных структурно-тектонических зон. Среди них поднятия Йимэн и Вэйбей, моноклинали Ишань, впадина Тяньхуань, а также разломно-складчатая зона Джинси и надвиговой пояс Сиюань. Мощность осадочного чехла, образованного породами палеозойского и мезозойского возраста, варьирует от 4 до 6 км. Лишь в западной периферийной части бассейна она превышает 10 км (рис. 1). На протяжении палеозоя бассейн находился в составе южной окраины Центрально-Азиатского океана. В мезозое здесь находился предгорный прогиб.

Геолого-разведочные работы на нефть и газ, начавшиеся в бассейне Ордос более 100 лет назад, привели к открытию в 1907 г. первого месторождения нефти. К концу XX в. здесь эксплуатировалось около 20 мелких нефтяных месторождений. Лишь относительно недавно в районе моноклинали Йимен выявлена протяженная зона газонакопления, приуроченная к породам ордовикского возраста. Площадь одного из газовых месторождений Сулигэ (Цзинбянь), расположенного в северо-восточной части моноклинали, достигает 2000 км², а его запасы оцениваются в 12 тсф газа. На северо-востоке от Сулигэ открыто более мелкое газовое месторождение Табамяо, строение которого

было исследовано автором (рис. 2). Залежи газа приурочены к ловушкам стратиграфического и литологического типов.

Состав палеозойских отложений в центральных районах бассейна Ордос. В основании осадочного чехла бассейна Ордос залегает кембрийский карбонатный комплекс, сложенный оолитовыми и микритовыми известняками и доломитами мощностью от 300 до 600 м. Они перекрыты породами нижнего ордовика. В западных районах бассейна разрез сложен карбонатными и терригенными обломочными образованиями, тогда как в восточных — карбонатными и глинистыми осадками, которые накапливались в Северо-Китайском эпиконтинентальном морском бассейне. Граница раздела между двумя зонами, отмеченная выклиниванием пластов терригенных кластических пород и сокращением мощности карбонатных образований, проходит вдоль 107° в.д.

Мощность палеокарста в восточных районах бассейна Ордос достигает 30 м. В центральном его секторе общая мощность нижнеордовикских пород меняется от 100 до 900 м, а верхняя часть пачки 5 сложена доломитами. Изучение изотопного состава газа показало, что его основным источником были нижнепермские терригенные глины и угли, широко распространенные во впадинах бассейна Ордос [Jinxing Dai et al., 2005]. В районе месторождения Сулигэ нижнеордовикские отложения представлены доломитами и доломитовыми глинами свиты Чжили и доломитами и глинистыми до-

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; e-mail: yilin.wang2013@gmail.com



Рис. 1. Широтный профиль через центральную часть бассейна Ордос, по [Yongtai Yang et al., 2005]: 1–8 — отложения: 1 — кембрийские, 2 — кембрийско-ордовикские, 3 — ордовикские, 4 — верхнекаменноугольно-пермские, 5 — триасовые, 6 — юрские, 7 — меловые, 8 — третичные; 9, 10 — месторождения: 9 — нефтяные, 10 — газовые

ломитами с пропластками кремней Лянжиашань, а коллекторские свойства продуктивного горизонта определяются строением и составом брекчии, заполняющей карстовые воронки в верхней части свиты Модягоу, венчающей разрез нижнего ордовика. Брекчия образована обломками известняков и доломитов разного размера (1–30 см), на многих из них присутствуют следы растворения. Матрикс представлен карбонатными зернами гравийной, песчаной и алевритовой размерности. В поровом пространстве коллектора преобладают каверны и межкристаллические поры. При этом значения пористости колеблются от 0,5 до 8%.

В составе свиты Модягоу, основного продуктивного комплекса в регионе, мощность которого в пределах моноклинали Йимен варьирует от 330 до 426 м, выделяются две толщи. Нижняя толща сформировалась в течение одного трансгрессивно-регрессивного цикла, поэтому она включает породы-коллекторы для залежей углеводородов, перекрытые соленосными породами, которые играют роль флюидоупора [Конюхов, 2013]. Отложения верхней толщи накапливались на протяжении двух полных трансгрессивно-регрессивных циклов. Регрессия, охватившая Ордосский бассейн в конце раннеордовикской эпохи, привела к замещению биокластовых карбонатных осадков микро-

зернистыми седиментационными доломитами, которые распространены на площади 15 000 км². Доломиты содержат гипсовые конкреции, обломки кристаллов галита и гипса.

С конца раннего ордовика и до начала каменноугольного периода аккумуляция осадков в бассейне Ордос не происходила. Этому интервалу здесь отвечает крупное региональное несогласие, поверх которого залегают терригенные отложения карбона и перми. Обломочный материал в центральные районы бассейна Ордос поступал из горноскладчатых сооружений Йен и поднятия Йимен. Многочисленные пласты угля, заключенные в толще верхнепалеозойских отложений, свидетельствуют о их преимущественно континентальном генезисе. Изотопный состав газа, заключенного в коллекторах нижнего ордовика, позволяет считать, что основным его источником были глины и угли раннепермского возраста, широко развитые во впадинах Ордосского бассейна.

Природный резервуар, в котором заключены основные залежи газа, приурочен к верхней части разреза — пачке свиты 5 Модягоу (m₅). Он сложен тонкокристаллическими доломитами, известняками и брекчированными породами, которые перекрыты массивными верхнеордовикскими известняками (свита Фенфен). На севере, в районе месторождения Сулигэ они размыты, и на породах свиты Модягоу с несогласием залегают каменноугольные отложения свиты Бенси. В нижней части разреза этой свиты они представлены каолиновыми глинами и бокситами, которые являются фрагментами реликтовой латеритной

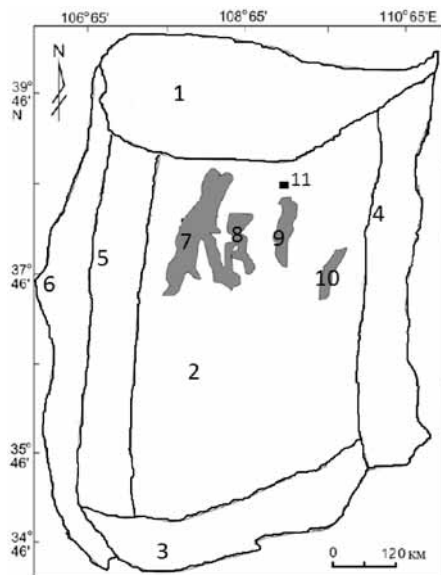


Рис. 2. Основные месторождения в бассейне Ордос, по [Jinxing Dai et al., 2005]: 1–6 — структурно-тектонические зоны: 1 — поднятие Йимен, 2 — моноклинали Ишань, 3 — поднятие Вэйбэй, 4 — разломно-складчатая зона Джинси, 5 — впадина Тяньхуань, 6 — надвиговый пояс Сиюань; 7–11 — месторождения газа: 7 — Сулигэ, 8 — Ушэнь, 9 — Юйлинь, 10 — Мичжи, 11 — Табамяо. Справа — месторождение бассейна Ордос

коры выветривания, сформировавшейся в процессе выветривания ордовикских карбонатов.

Согласно данным [Wang Baoging, Al-Aasm, 2002], в конце среднего ордовика отложения свиты Модягоу были выведены к поверхности, где в результате эрозии, которая продолжалась в течение силура и девона, в них образовалось большое количество карстовых воронок и пещер, которые после обрушения кровли были завалены ее обломками. Помимо хаотичной и мозаичной брекчии в продуктивном горизонте встречается много разбитых трещинами блоков, а в породах видны следы растворения.

Особенности строения реликтовой коры выветривания в районе Табамяо. На месторождении Табамяо, где отложения свит Чжили и Лян-жиаشانь отсутствуют, нижнеордовикский разрез представлен известняками, доломитами и эвапоритами свиты Модягоу, которую китайские геологи выделяют в качестве яруса. В основании толщи — подъярус 5 — залегает горизонт m_5^6 , сложенный ангидритовыми микрокристаллическими доломитами и глинистыми доломитами, в кровле которого развиты прослой строматолитовых доломитизированных известняков толщиной 1–1,5 м. В разрезе скважины Да-32 они перекрывают крупнокристаллический доломит, обогащенный гравийным материалом, в разрезе скважины Да-29 — залегают на голубовато-серых аргиллитах.

Выше выделяется пачка m_5^5 микрокристаллических тонкослоистых известняков и доломитов с прослоями глинистого известняка. В нижней и средней частях разреза преобладают известняки темно-серого и черного цвета. Они содержат прослой глинистого известняка, нередко с игольчатыми кристаллами ангидрита. В некоторых прослоях присутствует много зерен гравийной размерности, обломков водорослевых стяжений и фауны. Мощность этой пачки, которая повсеместно развита в районе месторождения Табамяо, варьирует от 25 до 30 м. Максимальной толщины (32,25 м) карбонатные породы достигают в северной части региона (скважина Да-2), минимальной (25,75 м) — на юге, в разрезе скважины Шэнь-1.

На кривых геофизических исследований скважин (ГИС) фиксируются аномально высокие значения электрического сопротивления и резкое снижение гамма-излучения. Первичный карбонатный микрозернистый ил накапливался в сублитеральных условиях открытого моря. Согласно материалам недавних исследований эта пачка отвечает подошве древней коры выветривания.

На слабоэродированной поверхности черных и серых известняков залегает пачка эвапоритов (m_5^4). Они представлены доломитами, глинистыми и ангидритовыми доломитами, а также доломитовыми аргиллитами, содержащими линзовидные пропластки вулканического туфа. В северных и центральных районах Ордосской впадины при-

сутствуют прослой и линзы ангидрита. В породах часто встречаются кристаллы гипса и каменной соли, вследствие чего эта пачка названа верхним гипсовым подъярусом.

Согласно данным бурения толщина отдельных пластов возрастает в западном направлении. Максимальная мощность пачки, в целом выдержанная на площади (24–30 м), составляет 34 м, минимальная — 20 м. Кривые ГИС нижнего и среднего горизонтов характеризуются низкими значениями гамма-излучения и высокими — электрического сопротивления. Для верхнего горизонта (m_5^4) типично частое чередование низких и высоких значений указанных показателей, что обусловлено переслаиванием чистых доломитов с глинистыми разностями этих пород.

Вышележащая пачка m_5^3 сложена светло-серыми и серыми слоистыми доломитами, которые содержат прослой глинистых и брекчированных доломитов, а также доломитовых аргиллитов. На месторождении Табамяо в породах постоянно присутствует небольшое количество кристаллов гипса и/или ангидрита. Несколькими скважинами в средней части этой пачки вскрыт массивный пласт доломита, который можно рассматривать в качестве потенциального резервуара для скоплений природного газа. Мощность пачки не превышает 14–20 м. В северном секторе района исследований породы подверглись денудации, поэтому их мощность сокращена до 6 м.

В подошвенной части разреза пачки m_5^2 наблюдается переслаивание глинистых доломитов с доломитовыми аргиллитами, которые перекрыты мощным пластом микрокристаллических доломитов с глыбовой структурой, ярко выраженной в ее кровле. По простиранию он сменяется каменной солью, что указывает на аккумуляцию осадков в осолоненной лагуне. Доломитовый пласт с глыбовой структурой прослеживается на значительное расстояние и рассматривается в качестве одного из лучших коллекторских горизонтов в северной части Ордосской впадины, в том числе на месторождении Табамяо. Свидетельство принадлежности пород к древней коре выветривания — наличие брекчированного доломита, который вскрыт бурением на ряде участков.

Верхняя пачка в составе подъяруса 5 свиты Модягоу претерпела наиболее серьезные трансформации в процессе денудации. Она сложена брекчированными микрокристаллическими доломитами и глинистыми доломитами с включениями ангидрита. Они содержат прослой и линзы доломитового ангидрита и доломитовых аргиллитов. Кроме того, здесь присутствуют обломочные и глинистые карбонатные породы, образованные зернами и обломками водорослевых известняков преимущественно гравийной размерности. Встречаются также линзовидные пропластки микрокристаллического анкерита и вулканиче-

ского туфа, часто доломитизированного. В разрезе пачки, мощность которой не превышает 12–15 м, выделяются 4 в разной степени эродированных пласта. Верхний пласт на большей части территории полностью размыт, остальные в полном объеме присутствуют в северных, центральных и юго-западных районах.

Судя по смене в разрезе нижних пачек свиты Модягоу аргиллитов и известняков последовательно доломитами, ангидритами и каменной солью, эти осадочные образования аккумулировались в регрессивную фазу очередного трансгрессивно-регрессивного цикла в морском заливе, который постепенно трансформировался в осолоненную лагуну, где в течение длительных засушливых сезонов испарялась морская вода. Позднее, в эпоху формирования верхних подразделений свиты, эта последовательность событий повторялась дважды. Очередной цикл начинался отложением карбонатных илов и доломитизированных известковых осадков, которые выше по разрезу сменялись известковыми доломитами и доломитизированными известняками с маломощными прослоями гипса и ангидрита. В северном направлении (район Отог) сульфаты исчезают, и разрез верхних пачек нацело сложен доломитами.

Вследствие воздымания, охватившего Ордосский бассейн в конце раннего ордовика, отложения Модягоу оказались на поверхности. В процессе длительной экспозиции верхний горизонт был частично размыт, а сохранившиеся породы брекчированы и закарстованы. Инфильтрация пресных поверхностных вод в более глубокие горизонты сопровождалась гидролизом и выщелачиванием карбонатов, что привело к формированию коры выветривания. Процессы эрозии практически не затронули нижние пачки подъяруса 5 (пачки m_5^5 и m_5^4). В более верхних пачках в том или ином виде присутствуют следы гидролиза и частичного разложения карбонатного субстрата. В наибольшей степени пострадала верхняя пачка, реликты которой сохранились лишь в пределах некоторых участков. Толщина ордовикской коры выветривания в северных районах моноклинали Йишан варьирует от 60 до 100 м (см. рис. 2). Изогипсы 80–100 м оконтуривают зоны распространения наиболее развитой и сохранившейся коры выветривания.

Породы в составе свиты m_5 характеризуются хорошо развитым пустотным пространством и обилием трещин, многие из которых унаследованы от стадии диагенеза. При исследовании шлифов выявлено три типа трещин, в большом количестве рассеянных в породах, которые образуют древнюю кору выветривания. Это стилолитовые, усадочные, коррозионные, а также микротрещины. Стилолитовые или усадочные трещины распространены повсеместно и нередко образуют разветвленную сеть. Коррозионные трещины развиты в пределах

коры выветривания в конкретных пластах или горизонтах. Это вертикальные трещины, возникшие при проникновении пресной воды в породы, которые были частично разрушены в процессе гидролиза и выщелачивания. Трещины этого типа обычно заполнены кальцитом или глинистым материалом.

Особо важную роль в превращении карбонатных пород в природные резервуары играют микротрещины. Они формируются не только в горизонтах коры выветривания, но и в подстилающих пластах. Изучение их распространения в керне, отобранном при бурении контрольной скважины, показало, что существует два вида микротрещин — заполненные и незаполненные вторичным материалом. На стенках вокруг микротрещин часто видны следы коррозии в форме пор и мелких каверн (рис. 3). Развитие микротрещин, очевидно, было вызвано тектонической активизацией, охватившей регион уже после формирования коры выветривания.

Газоносность отдельных горизонтов и пачек в разрезе свиты m_5 определяется их пористостью и проницаемостью. Как показано на рис. 4, наиболее высоким средним показателем пористости (>5%) характеризуются породы в составе нижней пачки m_5^5 коры выветривания. Максимальных значений достигает в них и коэффициент проницаемости. В образцах, где помимо пор развиты микротрещины, проницаемость часто превышает 1 мД, что значительно выше, чем в образцах из пластов в составе пачек m_5^2 и m_5^1 .

Результаты исследований. Сравнительный анализ петрографического состава, структуры пустотного пространства, а также значений пористости и проницаемости позволил выделить в составе коры выветривания, развитой на месторождении Табамяо, 5 типов пород-коллекторов [Ван Илин, 2015].

Тип I представлен мелкокристаллическим порошкообразным доломитом и известковым доломитом с кавернами, пустотами растворения и микротрещинами, которые наиболее широко распространены в горизонтах m_5^{1-3} , m_5^5 , m_5^{2-1} , m_5^{2-2} . Здесь выделяются два вида коллектора — поровый

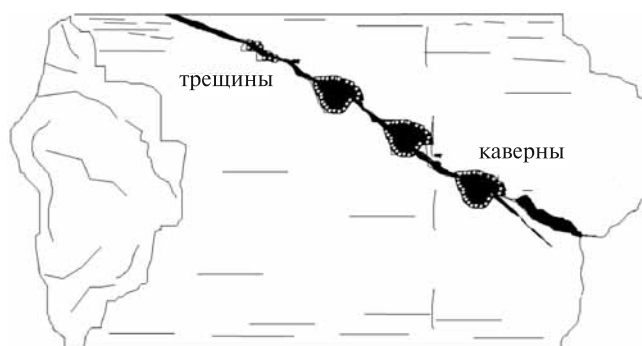


Рис. 3. Каверны выщелачивания по трещинам в доломитах Модягоу (пачка m_5^4)

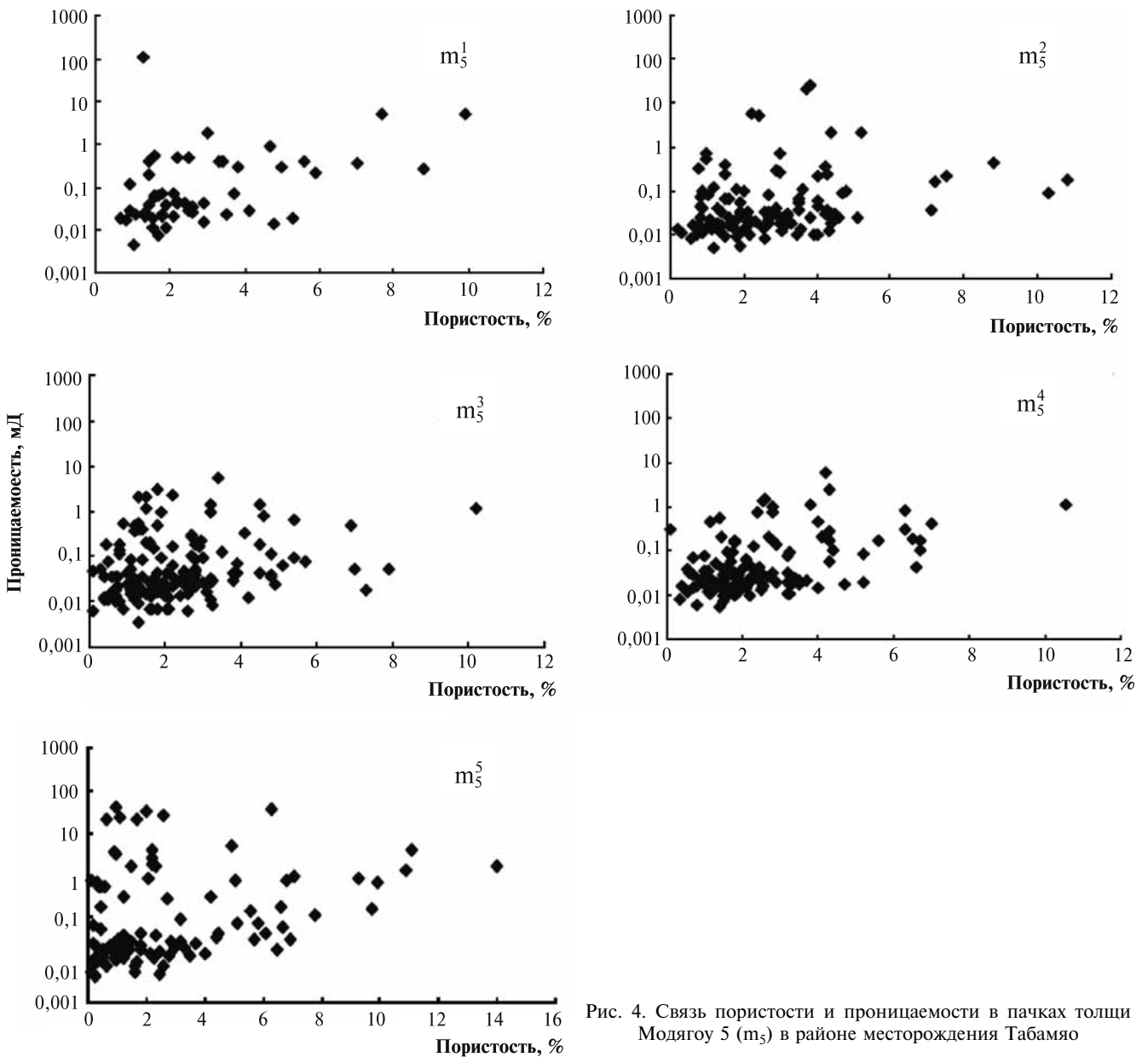


Рис. 4. Связь пористости и проницаемости в пачках толщи Молягоу 5 (m_5) в районе месторождения Табамяо

и порово-трещинный. Максимальный показатель пористости в породах-коллекторах типа I достигает 5%. В разностях, которые можно отнести к поровому коллектору, коэффициент проницаемости варьирует в пределах 0,1–1 мД; в разностях с порово-трещинной средой проницаемость гораздо выше — от 1 до 10 мД, иногда более 10 мД. Сравнительно большой радиус пор определяет низкие значения давления замещения, а также низкий средний показатель давления. К этому типу на месторождении Табамяо относятся природные резервуары с наиболее высокими коллекторскими свойствами.

К типу II относятся мелкозернистые порошковидные доломиты, известковые доломиты и доломитизированные известняки. В этих породах пустотное пространство обеспечивается присутствием пор растворения, микропор и микротрещин. Это позволяет отнести их к порово-трещинному типу коллектора, который

распространен в пластах m_5^{1-3} , m_5^5 , m_5^{2-1} , m_5^{2-2} . Максимальные значения пористости не превышают 2,5% при коэффициенте проницаемости от 0,1 до 1 мД (редко до 1–10 мД).

Тип III представлен породами со средними коллекторскими свойствами, в основном мелкозернистыми порошкообразными доломитами и доломитизированными известняками с порами растворения и микропорами, которые развиты во всех горизонтах. При значениях пористости, колеблющихся в диапазоне 2,5–5%, коэффициент проницаемости в породах не превышает 0,03–0,2.

К типу IV отнесены породы с весьма посредственными коллекторскими свойствами, которые распространены во всех выделяемых горизонтах. Их пустотное пространство определяется микропорами и микротрещинами, что позволяет отнести их к коллекторам порово-трещинного типа. Максимальные значения пористости не превышают 2,5% при значениях коэффициента проницаемо-

сти от 0,03 до 0,1 мД, в отдельных случаях более 1 мД. При малом размере пор средние значения давления достигают высоких значений.

В типе V выделены породы, которые встречаются во всех пачках и пластах, но не являются коллекторами нефти и газа. Их пустотное пространство определяется развитием микропор. Максимальные значения пористости в рассматриваемых породах иногда достигают 2,5%, однако коэффициент проницаемости не превышает 0,03 мД, что предопределяет затрудненность перемещения флюидов по этим образованиям.

Заключение. Газоносность горизонтов в коре выветривания, развитой в толще m_5 серии Модяогу, определяется главным образом шириной распространения коллекторов I типа. Особенно важную роль играют микротрещины, присутствие которых значительно повышает проницаемость пород, даже тех, которые подверглись воздей-

ствию пресных вод, приведшему к интенсивной доломитизации карбонатных осадков. Большое количество микротрещин, которые фиксируются в резервуарах II и III типов, делает их перспективными в отношении формирования залежей природного газа. Невысокая плотность микротрещин в коллекторах IV типа предопределила их слабую перспективность. Однако в сочетании с резервуарами более высокого класса они становятся довольно интересным объектом для поисков новых газовых скоплений в районе месторождения Табамяо.

Сложный палеорельеф в зоне денудации нижнеордовикских карбонатных пород затрудняет прогноз развития палеокарста в северных районах Ордосского бассейна. Однако результаты исследований позволяют надеяться на повышение эффективности дальнейших поисков скоплений газа в отложениях этого возраста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ван Илин. Особенности строения и процессы формирования природных резервуаров в составе коры выветривания ордовикских карбонатных пород в Ордосском бассейне (КНР) // Тез. доклад. науч. конф. «Новые идеи в геологии нефти и газа». М.: МГУ, 2015. С. 266–267.

Конюхов А.И. Нефтегазоносные бассейны на окраинах материков в палеоморях палеозоя. Сообщение 2. Нефтегазоносные бассейны на окраинах материков в Рейнском, Уральском и Центрально-Азиатском палеоморях // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 5. С. 461–485.

Jian Li, Wenzheng Zhang, Xia Luo et al. Paleokarst reservoir and gas accumulation in the Jingbian field, Ordos basin // Marine and Petroleum Geology. 2008. Vol. 25. P. 401–415.

Jinxing Dai, Jian Li, Xia Luo et al. Stable carbon isotope composition and source rock geochemistry of the giant gas accumulation in the Ordos basin // Organic Geochemistry. 2005. Vol. 36. P. 1617–1635.

Wang Baoging, I. Al-Aasm. Karst-controlled diagenesis and reservoir development: examples from the Ordovician main-reservoir carbonate rocks on the eastern margin of the Ordos basin // Bull. AAPG. 2002. Vol. 86, N 9. P. 1639–1658.

Yongtai Yang, Wei Li, Long Ma. Tectonic and stratigraphic controls of hydrocarbon systems in the Ordos basin: a multi cycle cratonic basin in central China // Bull. AAPG. 2005. Vol. 89, N 2. P. 255–269.

Поступила в редакцию
12.01.2016