

Генетическая обусловленность различных типов пустотного пространства и оценка качества нетрадиционных коллекторов отложений верхнедевонского доманикоидного комплекса Муханово-Ероховского прогиба

В.В. Чупахина*, Н.И. Коробова, Г.А. Калмыков, А.П. Завьялова,
М.Ю. Карпушин, К.А. Радченко

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Основные особенности формирования доманикоидных толщ, распространенных в широком стратиграфическом диапазоне от среднего франа позднего девона до турнейского яруса раннего карбона, исследованы уже довольно детально. Различные аспекты их изучения изложены во многих исследованиях, но до сих пор эти отложения рассматривались в основном как нефтематеринские породы. В данной статье доманикоидные отложения рассматриваются с точки зрения нетрадиционного коллектора нефти. Из-за сложного и неоднородного строения пород, неравномерного насыщения их органическим веществом и низких значений пористости, методология оценки фильтрационно-емкостных свойств не отработана в полной мере. Комплексный подход в изучении типов пустотного пространства таких отложений, включающий макро- и микроописание керна и аналитические исследования, позволяет прогнозировать зоны улучшенных свойств сложнопостроенных нетрадиционных коллекторов и наиболее успешно проводить их разработку. В результате проведенных исследований выделены основные литотипы, слагающие разрез доманикоидных отложений, и дана характеристика каждого из них. Сопоставление выделенных в шлифах типов пустотного пространства и данных лабораторных исследований позволили классифицировать основные типы коллекторов и провести оценку их качества.

Ключевые слова: доманикоидные отложения, Муханово-Ероховский прогиб, Волго-Уральский нефтегазоносный бассейн, пустотное пространство, нетрадиционный коллектор

Для цитирования: Чупахина В.В., Коробова Н.И., Калмыков Г.А., Завьялова А.П., Карпушин М.Ю., Радченко К.А. (2022). Генетическая обусловленность различных типов пустотного пространства и оценка качества нетрадиционных коллекторов отложений верхнедевонского доманикоидного комплекса Муханово-Ероховского прогиба. *Георесурсы*, 24(2), с. 139–149. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.14>

Введение

Формирование схожих по литологическому составу и структурным особенностям доманикоидных отложений связано с развитием Камско-Кинельской системы прогибов (ККСП). Она представляет собой тектоно-седиментационную структуру, в формировании которой, наряду с тектоническими движениями, основное значение имел некомпенсированный характер осадконакопления (Мирчинк и др., 1965). На месте обширного относительно глубоководного бассейна, существовавшего в доманиковое время (D_3fr_2) и занимавшего практически всю территорию Волго-Уральского бассейна, в позднефранское время (D_3fr_3) начинается формирование изолированных прогибов, которые продолжают своё существование вплоть до турнейского яруса раннего карбона (C_1t). Это объясняет широкий стратиграфический диапазон развития доманикоидных отложений (D_3fr_2 – C_1t) в ККСП. Говоря о тектонической составляющей, принимавшей участие в

формировании прогибов, необходимо особо подчеркнуть роль движений крупных блоков фундамента по палеозойским и протерозойским разломам. Морфологически ККСП представляет собой совокупность отрицательных структур, объединенных между собой и распространённых на большой территории Волго-Уральского бассейна.

Коллективом МГУ имени М.В. Ломоносова на протяжении многих лет изучались разрезы доманикоидных отложений в различных частях бассейна. Эти исследования включали в себя как изучение керна материала, так и естественных выходов пород в Пермском крае, Республике Башкортостан, а также Ухтинском районе (Ступакова и др., 2015; Завьялова и др., 2018). Формирование конденсированного разреза доманикоидных толщ всех изученных разрезов проходило в условиях быстрой морской трансгрессии и некомпенсированного осадконакопления, которое приурочено к относительно глубоководным впадинам на шельфе. При этом выделяется несколько фациальных зон, с которыми связаны различные типы разрезов, – мелководно-шельфовая и склоновая зоны, и зона внутришельфовых впадин (Ступакова и др., 2017).

Исследования, представленные в данной работе, включают изучение керна материала семи скважин, расположенных в различных частях Муханово-Ероховского

* Ответственный автор: Виталия Валерьевна Чупахина
e-mail: v.chupakhina@oilmsu.ru

© 2022 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0
License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

прогиба, который является южным ответвлением Камско-Кинельской системы прогибов (рис. 1).

Литологическая типизация

В строении разреза доманикоидных отложений участвуют карбонатные, глинистые породы и силициты, которые встречаются в различных сочетаниях. Отличительной особенностью изученных отложений является характер переслаивания пород и наличие высокоуглеродистых прослоев, обогащённых органическим веществом (ОВ).

На основании макро- и микроописания, а также данных рентгенофазового анализа керна выделены основные литотипы, слагающие разрез доманиковых отложений, и дана характеристика каждого из них (табл. 1, рис. 2).

Литотип 1: известняки микритовые – мадстоуны по усовершенствованной классификации Р. Данема (Embry, 1970), серые, темно-серые, черные, линзовидные и ко-со-линзовиднослоистые, нередко биотурбированные. Основная масса таких пород имеет тонко-микрокристаллическую структуру, количество биокластов здесь не превышает 10 %. Среди биокластов встречаются раковины тентакулитов.

Литотип 2: известняки органогенно-обломочные (вак-грейнстоун), обладают неравномерным соотношением форменных компонентов и микритового цемента – от 30 % до 50 %. Среди форменных компонентов преобладают биокласты тентакулит и брахиопод, иногда двустворок, а также неопределимый биогенный детрит и шлам. Обладают горизонтально-линзовидной текстурой, часто нарушенной биотурбированием.

Литотип 3: водорослевые известняки (баундстоун), серые, слоистые (горизонтально-волнистослоистые), часто мелкокаверзные и в различной степени нефтенасыщенные. Размер каверн достигает 1–3 мм, нередко внутренние полости каверн инкрустированы черным битумом. Неравномерно перекристаллизованные и в различной степени доломитизированные. Доломиты замещения темно-коричневого цвета, обладающие реликтовой водорослевой структурой.

Литотип 4: известняки обломочные (флоатстоун). Структура пород обломочная, иногда органогенно-обломочная, реже градационная. Часто такие породы выполняют карманообразные врезы, для них характерны нарушенные переотложением текстуры, а также неравномерное битумо-нефтенасыщение. Основными форменными компонентами таких пород являются плохо окатанные обломки известняков диаметром 3–5 мм (видимый) и длиной 0,5–1,5 см (видимый). Их количество составляет 50–60 %. Среди обломков встречаются: известняки слабоалевритистые, известняки водорослевые, известняки органогенно-обломочные, часто неравномерно перекристаллизованные. Цемент таких пород порового типа имеет керогеново-карбонатный и керогеново-карбонатно-кремнистый состав. Здесь же встречаются пустоты и микрокаверны, которые распространены неравномерно в породах. Среди вторичных преобразований преобладают процессы доломитизации (до 5 %), доломит встречается в виде субидiomорфных кристаллов диаметром до 0,1 мм. Реже наблюдаются процессы перекристаллизации, замещения аутигенным кремнеземом (халцедоном) ряда биокластов (до 1 %), а также стяжения аутигенного пирита диаметром до 0,1 мм.



Рис. 1. Карта района исследований

Литотип 5: доломиты замещения, темно-коричневые, неяснослоистые, часто пятнистые, нередко обладающие реликтовой водорослевой структурой, а также неравномерным битумо- и нефтенасыщением. Чаще всего представлены средне-крупнокристаллическими формами.

Литотип 6: силициты (в том числе радиоляриты), обычно содержат биокласты радиолярий, реже тентакулитов, нередко замещенных аутигенным халцедоном. Основная масса таких пород представлена изотропным реликтоморфным халцедоном.

Литотип 7: глинисто-кремнисто-карбонатные породы. Данный тип наиболее редко встречается в изучаемых разрезах и обычно представлен тонкими невыдержанными прослоями от 1 мм до 2 см. Слоистость горизонтальная, волнистая, часто невыдержанная. Нередко к таким прослоям приурочены стяжения пирита, а также скопления биогенного детрита.

Достаточно часто кремнисто-карбонатные (**Литотип 8**) и карбонатно-кремнистые породы (**Литотип 9**) образуют тонкие ритмичные чередования – ритмиты, где толщина каждого простоя может начинаться с нескольких миллиметров. Породы темно-серые и черные, с тонко горизонтальной слоистостью, представлены чередованием микрослоев кремнистого и карбонатного состава. Встречаются прослои толщиной до 1 см, к которым приурочены стяжения аутигенного пирита. Часто в таких породах встречаются радиоляриты, формирующие прослои толщиной 1–2 мм. Скелеты радиолярий часто выполнены халцедоном, стенки деформированы и частично растворены. К таким породам приурочены прослои вулканомитового материала.

В используемой литологической типизации для определения пород с содержанием $C_{орг} > 5\%$ (**Литотипы 10–13**) используется термин «кероген». Как аналитическое понятие кероген – это нерастворимое в органических растворителях углеводородное соединение (Богородская и др., 2005). Но при изучении состава породы стандартными методами тяжело разделить разные компоненты органического вещества без дополнительных исследований. В данной работе под термином «кероген» понимается вся совокупность ОВ, которое может являться как компонентом матрицы, так и занимать поровое пространство породы. Высокоуглеродистые породы (**Литотипы 10–13**) представлены черными керогеново-карбонатными, керогеново-кремнисто-карбонатными, керогеново-карбонатно-кремнистыми и керогеново-кремнистыми разностями.

Лито-тип	Название	Характеристика форменных компонентов	Характеристика матрикса	Соотношение форменных компонентов / матрикса (%)	Вторичные преобразования		Пустотное пространство (преобладающее)	Тип коллектора
					Тип	% воздей- ствия		
1	Известняки микритовые (мадстоун)	биокласты двустворок, криноидей зерна кальцита	микритовый до 90-95 %	содержание зерен менее 10 %, матрикса - 90 %	Перекристаллизация, спатиризация, пиритизация	<5 %	Межкристаллические поры	поровый
2	Известняки органогенно-обломочные (вак-грейнстоун)	биокласты двустворок (1*1,5-2 см) перекристаллизованные раковины форменифер (до 1,5 см в диаметре) биокласты тентакулитов (0,5-1 мм) биокласты брахиопод биокласты гасторопод биокласты остракод (0,5 см)	микритовый 60-70 % спаритовый 20-30 %	подразделяются на грейнстоуны, пакстоуны и вакстоуны - (по соотношению форменных компонентов к микритовому цементу, неравномерное от 80 до 30 % соответственно)	Перекристаллизация, спатиризация, растворение, доломитизация	>20 %	Межкристаллические и внутриформенные поры	поровый, трещинно-поровый
3	Известняки водорослевые (баундстоун)	зеленые, сине-зеленые водоросли (пелитоморфные слоивища) раковины фораменифер (0,5-3 мм) фрагменты члеников криноидей	спаритовый (50-60 %) микритовый (до 20-30 %)	соотношение каркаса и заполнителя 80/20 %	Перекристаллизация, доломитизация	до 20 %	Внутриформенные и межформенные поры и каверны	каверно-поровый
4	Известняки обломочные (флоатстоун)	обломки известняков от 0,5*1,5 мм до 1*5 см биокласты двустворок членики криноидей кристаллы кальцита (до 0,03 мм)	микритовый карбонатный и кремнисто-карбонатный	литокластовые (цемента 10-40 %), кристаллокластовые (цемента 10-20 %),	Доломитизация, перекристаллизация, замещение аутигенным кремнеземом, пиритизация	5-10 %	Межформенные поры и трещины выщелачивания	порово-трещинный
5	Доломиты	зерна от 0,05 мм до 0,4 мм обломки раковин двустворок 0,05 мм (до 5 %)	кристалло-морфная структура, матрикс	доломиты замещения кристаллические разности	Результат вторичных преобразований		Межкристаллические поры	поровый
6	Силициты	реликты раковин радиолярий диаметром до 0,1 мм.	криптозернистая халцедоновая и кварцево-халцедоновая масса	общее содержание форменных компонентов не более 15-20 %, матрикса 80-85 %	Растворение, перекристаллизация, трещиннообразование	до 20 %	Разноориентированные трещины, микрокаверны приуроченные к радиоляриевым прослоям	трещинный, каверно-поровый
7	Смешанные глинисто-кремнисто-карбонатные	раковины тентакулит (0,2-2мм) обломки раковин (до 0,5 мм в диаметре) шламовый детрит (до 0,01 мм) в кремневых слоях биогенные компоненты замещены криптозернистой кварц-халцедоновой массой	пелитоморфная глинисто-кремнисто-карбонатная масса насыщенная бесструктурным ОВ	20-40 % / 80-60 %	Перекристаллизация форменных компонентов, пиритизация	<5 %	Микротрещины параллельные напластованию	трещинно-поровый
8	Карбонатно-кремнистые	раковины тентакулит до 0,5 мм, раковин радиолярий (0,05-0,2 мм), вулканомиковый материал	криптозернистая халцедоновая и кварцево-халцедоновая масса	40-60 % / 60-40 %	Растворение, перекристаллизация, трещиннообразование, окремнение	10-15 %	Разноориентированные трещины, поры приурочены к участкам пере кристаллизации форменных компонентов. Внутриформенные поры, приуроченные к радиоляриевым прослоям	порово-трещинный, трещинно-каверно-поровый

Табл. 1. Литологическая типизация разреза доманикоидных отложений Муханово-Ероховского прогиба (по Завьяловой, 2021, с изменениями)

9	Кремнисто-карбонатные	раковины тентакулит (0,2-2 мм) обломки раковин (до 0,5 мм в диаметре) шламовый детрит (до 0,01 мм)	кремнисто-карбонатная масса изотропная, микрозернистая	содержание форменных компонентов 10-50 %, матрикса – 50-90 %	Растворение, перекристаллизация, трещинно-образование	10-15 %	Разноориентированные трещины, поры приурочены к участкам перекристаллизации форменных компонентов	порово-трещинный
10	Керогеново-карбонатные	биокласты раковин тентакулит (0,05 -0,5 мм) остракод (до 0,8 мм), тонкий шламовый детрит	(сапропелевый) поровый, кальцитовый спаритовый	содержание форменных компонентов 50-60 %, матрикса – 50-40 %	Перекристаллизация, пиритизация	до 10 %	Микротрещины параллельные напластованию и развивающиеся вдоль них поры, внутрiformенные поры	трещинно-поровый
11	Керогеново-кремнисто-карбонатные	тентакулиты, размерами в продольном сечении до 1,0 мм, в поперечном от 0,1 до 0,5 мм	кремнисто-карбонатная масса изотропная, микрозернистая насыщенная бесструктурным ОБ	40-60 % / 60-40 %	Перекристаллизация, растворение, пиритизация	10-15 %	Вторичные пустоты выщелачивания, сообщающиеся по трещинам	трещинно-поровый
12	Керогеново-карбонатно-кремнистые	кристаллы кальцита 0,005-0,02 мм, биогенный детрит до 0,1 мм	керогеново-кварц-халцедоновая изотропная микрокристаллическая масса насыщена бесструктурным ОБ	40-60 % / 60-40 %	Перекристаллизация, растворение, окремнение	10-15 %	Вторичные пустоты выщелачивания, сообщающиеся по трещинам	трещинно-поровый
13	Керогеново-кремнистые	остатки раковин радиолярий, остатки тентакулит, выполненные халцедоном (0,05-0,2 мм)	битуминозно-халцедоновая пелитоморфная, криптозернистая масса	10-15 % / 90-85 %	Перекристаллизация, растворение, окремнение	до 20 %	Разноориентированные трещины	трещинный

Табл. 1. Продолжение. Литологическая типизация разреза доманикоидных отложений Муханово-Ероховского прогиба (по Завьяловой, 2021, с изменениями).

Все они отличаются различным соотношением пелитоморфного кремнистого, микритового карбонатного и бесструктурного керогенового вещества, тонкой горизонтальной и линзовидно-горизонтальной слоистостью, присутствием биокластов тентакулитов, которые обычно четко приурочены к плоскостям напластования. При этом содержание ОБ в таких породах может быть велико и достигать 25 %. Для более детального изучения органической компоненты в составе матрицы породы рекомендуется изучать образцы в шлифах после экстракции.

Вторичные процессы

Важным фактором, влияющим на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) изучаемых отложений, являются вторичные процессы, которые изменяют первичную структуру пород. Фильтрационные и емкостные свойства доманикоидной высокоуглеродистой толщи определяются структурно-текстурной неоднородностью и напрямую зависят от вторичных процессов: соотношением пустот растворения (микрокаверны), перекристаллизации, трещин и микротрещин.

Среди литогенетических изменений и вторичных процессов в изученных разрезах можно выделить 3 основные группы, объединенные по преобладающему процессу их формирования:

- перекристаллизация;
- метасоматоз и аутигенное минералообразование;
- стиллолит- и трещинообразование.

Для биокластовых известняков обычно характерен микритовый седиментационный цемент. Процессы перекристаллизации здесь приводят к образованию перекристаллизованных известняков, которые утратили свою первичную органогенно-обломочную структуру. Для пород смешанного типа также характерны процессы перекристаллизации, связанные с формированием линзовидных слоев органогенно-обломочных известняков со спаритовым цементом. Перекристаллизация исходного пелитоморфного карбонатного и биогенного кремнистого материала начинает проявляться на самых ранних стадиях диагенеза с образованием микрокристаллических агрегатов карбоната и халцедона. Преобразование же на последующих стадиях приводит к частичной и полной перекристаллизации органогенного и обломочного карбонатного материала вплоть до формирования кристаллических известняков.

Процессы аутигенного минералообразования проявлены во всех литотипах и связаны с образованием пирита, оксидов железа, микроконкреций коллофана. Пиритизация проявлена в виде конкреций пирита, их скоплений, и наиболее часто встречается в разрезе доманикоидной толщи.

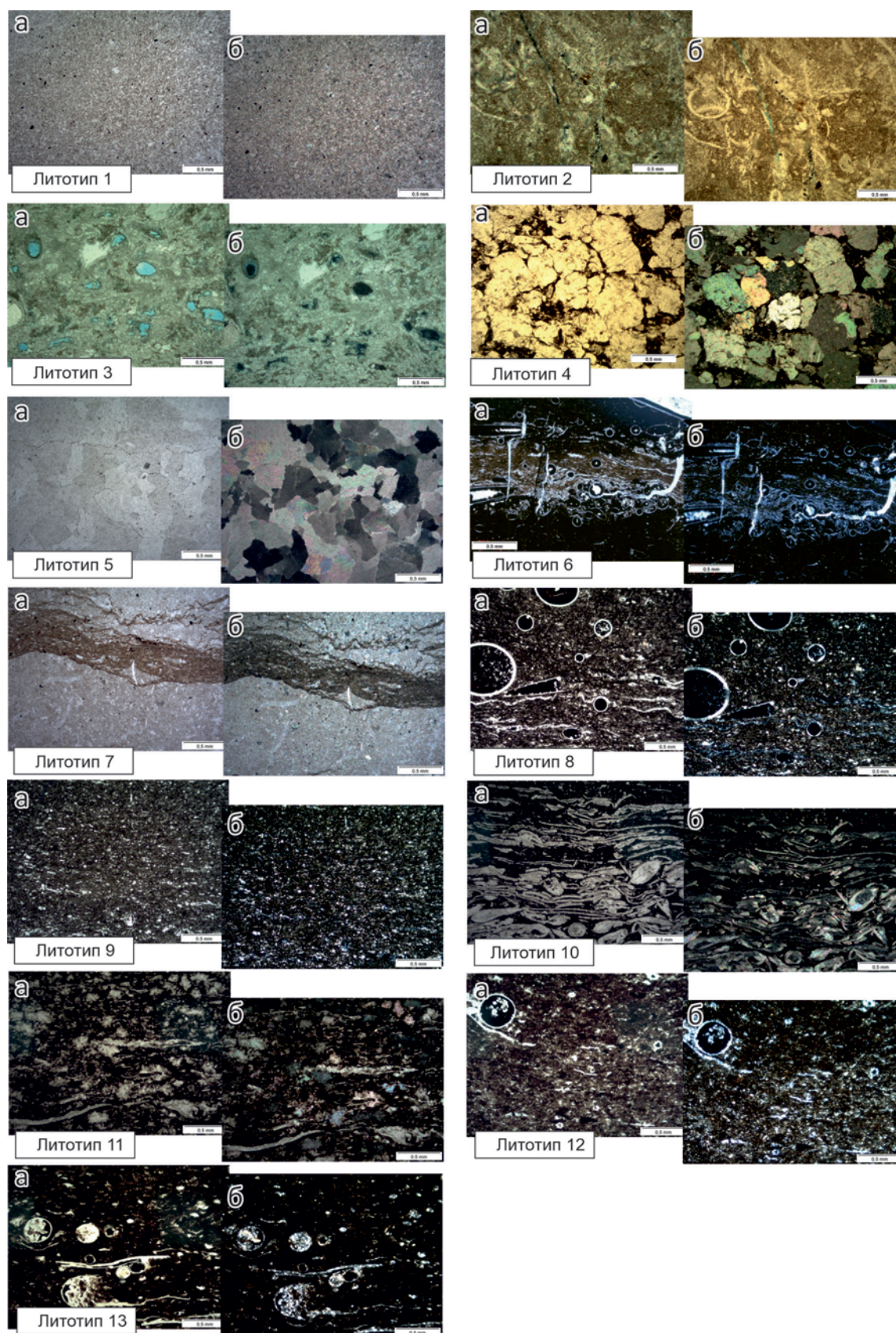


Рис. 2. Фото шлифов литотипов, выделенных в изученных отложениях (а – в проходящем, б – в отраженном свете). Литотип 1 – известняк (мадстоун) неравномерно перекристаллизованный; Литотип 2 – известняк органогенно-обломочный (пакстоун); Литотип 3 – известняк водорослевый (баундстоун); Литотип 4 – известняк обломочный (литокластовый) битумным поровым цементом; Литотип 5 – доломит средне-крупнокристаллический; Литотип 6 – силицит с реликтами тентакулитов; Литотип 7 – контакт известняка (мадстоун) и глинисто-карбонатной породы; Литотип 8 – карбонатно-кремнистая порода с биокластами тентокулитов; Литотип 9 – кремнисто-карбонатная порода; Литотип 10 – керогеново-карбонатная порода с прослоями, обогащенными раковинами двустворок и тентакулитов; Литотип 11 – керогеново-кремнисто-карбонатная порода с биокластами тентакулитов и остракод; Литотип 12 – керогеново-карбонатно-кремнистая порода с биокластами тентакулитов; Литотип 13 – керогеново-кремнистая порода с прослоями, обогащенными раковинами радиолярий и биокластами тентакулитов.

Также широко распространены процессы метасоматоза, которые связаны с взаимодействием минералов породы с флюидом, заполняющим поры, что, в свою очередь, приводит к замещению матрикса горной породы и изменению первичного состава. Продуктом метасоматоза в изученных отложениях является доломитизация и часто встречается в известняках, однако частичная доломитизация отмечается и в смешанных высокоуглеродистых породах. Формы проявления окремнения и его интенсивность изменчивы в разных частях разрезов и литологических типах пород. Окремнение проявляется в виде формирования конкреций, заполнения полостей раковин, очаговым и полным замещением первичной породы/осадка. Основными минералами являются халцедон и кварц.

Трещины в разрезе доманикоидного типа по генезису можно разделить на 2 основные группы: 1) первичные (седиментационные) трещины, приуроченные к процессам уплотнения, кристаллизации вещества, ориентированы параллельно напластованию; 2) вторичные трещины, связанные с различными процессами гипергенеза, катагенеза, метагенеза, а также тектоническими напряжениями. Конфигурация трещин разнообразна. Они часто секут напластование (Бурлин и др., 1991). Трещины первой группы распространены в конденсированном разрезе с преобладанием высокоуглеродистых смешанных пород, имеющих тонкослоистую и сланцеватую текстуру. Эти трещины обусловлены процессами седиментации и приурочены к границам слоев в пласте. Трещины чаще открытые, тонкие (раскрытостью до 0,01 мм), нередко минерализованы микрокристаллическим агрегатом халцедона. Вторичные трещины, секущие напластование, развиты во всех типах пород, но особенно характерны для плотных разностей (известняков и силицитов). В таких породах часто встречаются разнонаправленные трещины, основная часть которых залечена кальцитом и более ранним кварц-халцедоновым агрегатом. В прослоях известняков встречены как редкие открытые трещины шириной до 1 мм, так и более мелкомасштабные, залеченные кальцитом.

Типы коллекторов и их свойства

Доманикоидные толщи долгое время рассматривались исключительно с точки зрения нефтематеринских. Но современные реалии, а именно ежегодное снижение добычи, в том числе в Волго-Уральском бассейне, который находится на поздней стадии разработки, призывают к более эффективному и высокотехнологичному освоению недр. Благодаря современному геолого-техническому оснащению стала возможна разработка низкопроницаемых коллекторов, которая успешно применяется за рубежом (формации Игл Форд «Eagle Ford», Баккен «Bakken»). Помимо доманикоидной формации к нетрадиционным относится также и баженовская высокоуглеродистая формация, изучению которой в последнее время было посвящено много исследований, в том числе работы по изучению литологического строения и коллекторских свойств (Калмыков, 2016; Балущкина, 2012; Немова, 2021 и др.).

Основным критерием, определяющим коллектор, является способность породы вмещать и пропускать через себя флюид. Он характеризуется двумя параметрами – емкостью (пористость) и проницаемостью. Последний

является определяющим для естественных коллекторов. Изучение коллекторских свойств пород обычно основывается на лабораторных данных пористости и проницаемости. Одним из ключевых аспектов, которое достаточно часто упускается из внимания, является микроскопическое исследование пустотного пространства пород в шлифах. Изучение вещественного состава более 350 образцов, характеристика преобладающих литогенетических процессов и вторичных изменений пород в них, позволили выделить различные типы пустотного пространства и их приуроченность к каждому ранее описанному литотипу. Оценка ФЕС проведена на основании комплекса лабораторных исследований, проводившихся сотрудниками кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых МГУ имени М.В. Ломоносова. Этот комплекс включал в себя измерение открытой пористости по газу ($K_{\text{п}}$) и абсолютной газопроницаемости ($K_{\text{пр}}$).

Использованный комплексный подход для изучения пустотного пространства пород доманикоидной высокоуглеродистой формации позволил классифицировать 5 основных типов коллекторов и провести оценку их качества (рис. 3). Среди них выделяются:

- поровый;
- микро-каверново-поровый;
- трещинно-поровый;
- порово-трещинный;
- трещинный.

К *поровому типу* отнесены породы-коллекторы, в которых мелкие поры (< 1 мм) относительно изометричной формы соединены между собой проводящими (поровыми) каналами. Общей особенностью коллекторов порового типа, если их поровое пространство не заполнено углеводородами, является постепенное понижение коллекторских свойств с глубиной за счет уплотнения пород, минерального новообразования и других процессов. В разрезах высокоуглеродистой формации этот тип пород-коллекторов тесно связан с карбонатными породами. Коллекторы порового типа обычно включают два типа пустот и пор: внутриформенные и межкристаллические. Следует отметить, что подобные типы пустот могут встречаться совместно в одной породе.

Внутриформенные поры приурочены к форменным (структурным) компонентам органогенно-обломочных известняков, часто связаны с биокластами остракод, брахиопод и других биогенных и биохемотрогенных составных частей пород. Диаметр пор составляет 0,05–0,3 мм, значения пористости – 2–3 %, проницаемость редко превышает 0,2–0,5 мД.

Межкристаллические поры связаны с участками перекристаллизации и доломитизации пород, а именно с межкристаллическим пространством. Встречаются в различных литотипах известняков и доломитов. Такие поры часто угловатой и неправильной формы. Их диаметр варьирует от 0,08 мм до 0,25 мм, пористость редко превышает 2 %, а проницаемость – 0,1 мД.

Коллекторы *микро-каверново-порового типа* в разрезах встречаются редко. Обычно приурочены к участкам перекристаллизации кремнистого вещества, где формируются микрокаверны размером до 0,1 мм.

В результате взаимодействия различных литологических процессов формируются сложнопостроенные

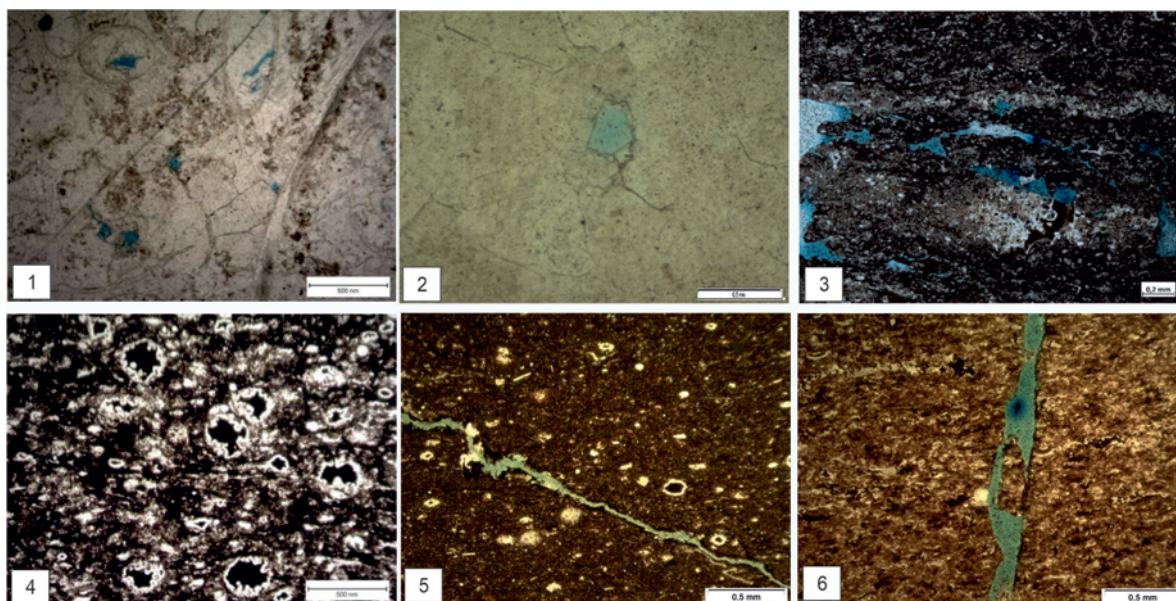


Рис. 3. Типы коллекторов доманикоидных отложений. 1 – поровый тип (внутриформенные поры) в известняках органо-обломочных (накстоун); 2 – поровый тип (межкристаллические поры) в участках перекристаллизации известняка; 3 – трещинно-поровый тип в керогеново-карбонатно-кремнистом ритмите; 4 – каверно-поровый; 5 – порово-трещинный тип в карбонатно-кремнистой породе; 6 – трещинный тип в карбонатно-кремнистом ритмите.

коллектора трещинно-порового, трещинно-каверново-порового, порово-трещинного типов. Появление полезной емкости в таких породах определяется постседиментационными процессами, где исходные значения фильтрационно-емкостные параметров были очень низкими.

Трещинно-каверново-поровый и трещинно-поровый типы коллекторов обычно связаны с участками выщелачивания и трещиноватости пород. Полезная емкость здесь определяется наличием вторичных пустот и микрокаверн выщелачивания, сообщаемость которых обеспечивается трещинами. Значения пористости в среднем составляют 3–4 %, иногда достигают 10 %, а значения коэффициента проницаемости варьирует от 0,5 до 1,5 мД.

Коллекторы трещинно-порового типа в разрезах скважин встречаются значительно чаще остальных. Полезная емкость таких коллекторов определяется наличием вторичных пустот, которые ориентированы вдоль трещин. Значения пористости пород коллекторов невелики и составляют в среднем 1–3,5 %, а значения коэффициента проницаемости варьирует от 0,01 до 1 мД. Такие коллекторы обычно приурочены к неравномерно перекристаллизованным известнякам, смешанным керогеново-карбонатно-кремнистым, керогеново-кремнисто-карбонатным породам и ритмитам. По опубликованным данным (Ульмишек и др., 2017) выявлена «пористость керогена», связанная с процессами генерации нефти и газа. Диаметр таких пор измеряется десятками и первыми сотнями нанометров.

Порово-трещинный тип коллектора наблюдается преимущественно в известняках тентакулитовых (пакгрейнстоунах), а также кремнисто-карбонатных и карбонатно-кремнистых ритмитах и керогеново-карбонатных породах; связан с процессами перекристаллизации карбонатного вещества, а также постседиментационной трещиноватостью пород.

Коллекторы трещинного типа встречаются в смешанных типах пород, наиболее распространены в

глинисто-карбонатных, плотных карбонатно-кремнистых и кремнистых породах. Здесь трещины определяют фильтрационные свойства пород, при этом значения пористости составляют не более 2 %, а проницаемость варьирует от 15 до 100 мД.

Согласно различным классификациям (Ханин, 1965; Багринцева, 1999), породы с проницаемостью <1 мД относят к коллекторам, не имеющим промышленного значения. Изучаемые породы характеризуются достаточно низкими ФЕС и являются низкопроницаемыми, если рассматривать их с точки зрения традиционных коллекторов. Доманикоидные отложения относятся к категории трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ), разработка которых требует дополнительных технических воздействий, как, например, гидроразрыв пласта. В связи с этим, использование стандартных классификаций коллекторов нецелесообразно, а параметр фильтрации для таких отложений можно рассматривать в более широком диапазоне (Прищепа и др., 2014).

Для оценки качества коллекторов предлагается расширить граничные значения пористости и проницаемости. Также важно учитывать литологическую характеристику отложений и тип пустотного пространства. Такое комплексное изучение нетрадиционных коллекторов позволяет наиболее детально и точно осуществлять прогноз развития коллекторов в разрезе. В предложенной классификации (табл. 2) учитываются ФЕС пород, тип породы и преобладающий тип пустотного пространства для каждого из них. По параметру проницаемости изученные породы делятся на 2 группы: технически-стимулируемые и проницаемые. Технически-стимулируемые породы обладают весьма низкими значениями проницаемости – меньше 1 мД, и подразделяются на непроницаемые ($K_{пр} < 0,01$ %) и низкопроницаемые ($K_{пр} = 0,01–1$ мД). Породы, для которых $K_{пр}$ превышает 1 мД, относятся к проницаемым. Емкостные характеристики также учитываются в оценке качества нетрадиционных коллекторов и подразделяются на 4 группы: *очень низкоемкие*, для которых пустотное

		Очень низкоемкий ($K_{\text{н}} < 1 \%$)	Низкоемкий ($K_{\text{н}} = 1-3 \%$)	Емкий ($K_{\text{н}} = 3-5 \%$)	Высокоемкий ($K_{\text{н}} > 5 \%$)
Технически- стимулируемые породы	Непроницаемые ($K_{\text{тр}} < 0,01$ мД)	Плотные известняки (мадстоуны) <i>поровый тип</i>	Известняки органогенно-обломочные (пак-грейнстоуны) <i>трещинно-поровый тип</i> Керогеново-карбонатные породы <i>трещинно-поровый тип</i>		
	Низкопроницаемые (0,01-1 мД)	Известняки органогенно- обломочные (вак-пастоуны) <i>трещинно-поровый тип</i>	Известняки обломочные <i>порово-трещинный тип</i>	Кремнисто-карбонатные и карбонатно- кремнистые породы, обогащенные вулканомиктовым материалом <i>трещинно-поровый тип</i>	
			Керогеново-карбонатно- кремнистые <i>трещинно-поровый тип</i>		
Проницаемые ($K_{\text{тр}} > 1$ мД)		Известняки органогенно- обломочные (вак-пастоуны) <i>трещинно-поровый тип</i>	Карбонатно-кремнистые и кремнисто- карбонатные ритмиты <i>порово-трещинный тип</i> Кремнистые породы <i>трещинный тип</i>	Карбонатно-кремнисты и кремнисто- карбонатные породы с прослоями радиоляритов <i>трещинно-каверно-поровый тип</i>	

Табл. 2. Классификация и оценка качества нетрадиционных коллекторов доманикоидных отложений

пространство практически отсутствует ($K_n < 1\%$); *низкоемкие*, для которых K_n варьирует от 1 до 3 %; *емкие*, где открытая пористость изменяется в пределах от 3 до 5 %, и *высокоемкие* породы, для которых K_n больше 5 %.

Оценка качества нетрадиционных коллекторов проводилась на основании взаимосвязи полученных данных литологической типизацией разреза, преобладающих типов пустотного пространства для каждого литотипа, а также сопоставления аналитических данных. Обобщение этих данных дает более полное представление о типах и качестве коллекторов (рис. 4).

К коллекторам с неудовлетворительным качеством относятся различные типы известняков с поровым и трещинно-поровым типом пустотного пространства. Они характеризуются низкой емкостью, при этом проницаемость в редких случаях может превышать 1 мД. Исходные низкие значения пористости, а также вторичные процессы перекристаллизации в значительной мере определяют низкое качество таких коллекторов.

Коллекторы удовлетворительного качества обладают более высокой емкостью ($K_n = 1-3\%$). К ним относятся органогенно-обломочные известняки (пак-грейнстоуны), керогеново-карбонатные породы и керогеново-кремнисто-карбонатные породы, в которых преобладает трещинно-поровый тип пустотного пространства, сформировавшийся вследствие неравномерной перекристаллизации пород. Качество коллекторов, приуроченных к обломочным известнякам, также удовлетворительное. Пустотное пространство таких пород обусловлено постседиментационными процессами (перекристаллизация, трещинообразование) и формирует порово-трещинный тип коллектора.

Наилучшими коллекторскими свойствами обладают кремнисто-карбонатные, карбонатно-кремнистые и кремнистые породы. Участки улучшенных ФЕС приурочены к прослоям, обогащенным раковинами радиолярий, а также вулканомиктовым материалом. Пустотное пространство

таких пород связано с формированием вторичных пустот и микрокаверн выщелачивания, связанных между собой трещинами.

Заключение

Доманикоидные отложения долгое время рассматривались исключительно с точки зрения нефтематеринских. Но последние исследования, посвященные перспективам нефтегазоносности пород доманикоидных толщ и полученным притокам нефти из них, заставляют более детально подойти к изучению их коллекторских свойств. Сложность строения разреза до сих пор не позволяет осуществлять постоянную промышленную добычу нефти. Исследования, проведенные в рамках статьи, направлены на детальное изучение этих отложений с точки зрения нетрадиционных коллекторов.

В результате исследований выделены 13 основных литотипов, слагающих разрез доманикоидных отложений, и дана характеристика каждого из них. На основании микроскопического изучения зерна выделены основные типы пустотного пространства, среди которых преобладают сложнопостроенные коллекторы трещинно-порового, трещинно-каверново-порового, порово-трещинного типов. Фильтрационные и емкостные свойства таких коллекторов определяются структурно-текстурной неоднородностью и напрямую зависят от вторичных процессов, которые изменяют первичную структуру пород.

Сопоставление выделенных в шлифах типов пустотного пространства и данных лабораторных исследований позволили классифицировать основные типы коллекторов и провести оценку их качества. Наилучшими коллекторскими свойствами обладают кремнисто-карбонатные, карбонатно-кремнистые породы и силициты, в которых развиты коллекторы трещинного и порово-трещинного типа, а наибольшие значения пористости приурочены к прослоям, обогащенным раковинами радиолярий и вулканомиктовым материалом. Трещинно-поровые коллекторы,

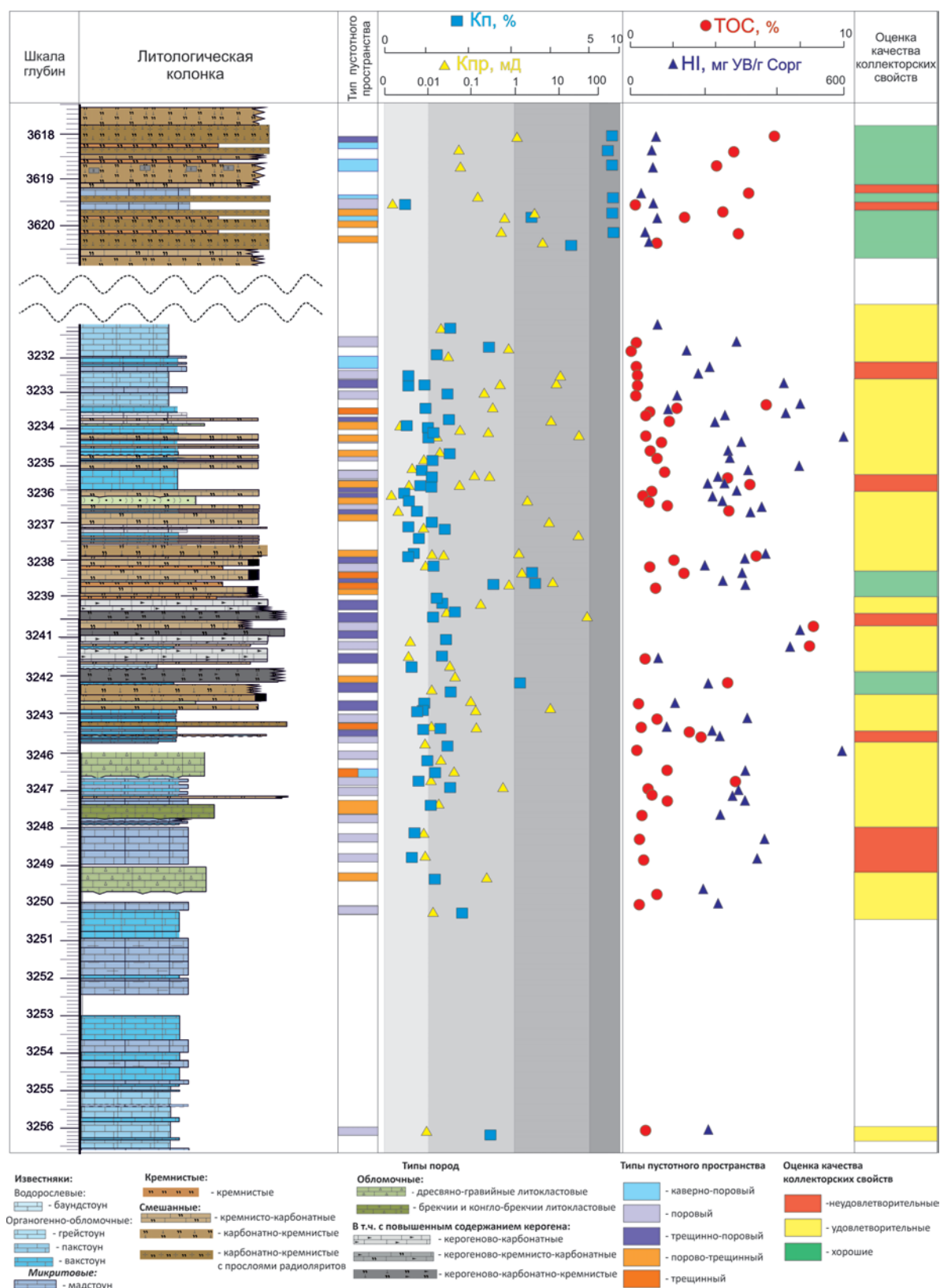


Рис. 4. Сводный литологический разрез доманикоидных отложений с выделением типов пустотного пространства и оценкой качества коллекторов

приуроченные к высокоуглеродистым породам, характеризуются более низкими коллекторскими свойствами. К коллекторам с неудовлетворительным качеством относятся различные типы известняков с поровым и трещинно-поровым типом пустотного пространства.

Анализ распределения типов пустотного пространства в разрезе позволяет генерализировать и определить

преобладающий тип пустотного пространства для каждого типа пород. Для оценки латеральной изменчивости пород необходимо их дальнейшее изучение, а именно увязка полученных данных с более крупномасштабными методами, таким как геофизические методы исследования скважин, что позволит прогнозировать развитие коллекторов с улучшенными свойствами в разрезе и на площади.

Благодарности

Авторы выражают большую благодарность анонимным рецензентам за ценные замечания и конструктивные предложения, которые в значительной мере способствовали улучшению работы.

Литература

- Багринцева К.И. (1999). Условия формирования и свойства карбонатных коллекторов нефти и газа. М: РГГУ, 285 с.
- Балушкина Н.С. (2012). Литофизическая типизация и нефтеносность пород баженовского горизонта в зоне сочленения Сургутского и Красноленинского сводов. *Дис. канд. геол.-мин. наук*. М: МГУ, 163 с.
- Богородская Л.И., Конторович А.Э., Ларичев А.И. (2005). Кероген. Методы изучения, геохимическая интерпретация. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 254 с.
- Бурлин Ю.К., Конохов А.И., Карнюшина Е.Е. (1991). Литология нефтегазоносных толщ. М: Недра, 286 с.
- Завьялова А.П. (2021). Условия формирования и перспективы нефтегазоносности отложений доманикоидного комплекса франско-турнейского возраста Муханово-Ероховского прогиба. *Дис. канд. геол.-мин. наук*. М: МГУ, 163 с.
- Завьялова А.П., Чупахина В.В., Ступакова А.В., Гатовский Ю.А., Калмыков Г.А., Коробова Н.И., Суслова А.А., Большакова М.А., Санникова И.А., Калмыков А.Г. (2018). Сравнение разрезов доманиковых отложений Волго-Уральского и Тимано-Печорского бассейнов в местах естественного выхода на дневную поверхность. *Вестник МГУ, сер. 4. Геология*, 6, с. 57–73. <http://doi.org/10.33623/0579-9406-2018-6-57-73>
- Калмыков Г.А. (2016). Строение баженовского нефтегазоносного комплекса как основа прогноза дифференцированной нефтепродуктивности. *Дис. докт. геол.-мин. наук*. М: МГУ, 391 с.
- Мирчин М.Ф., Хачатрян Р.О., Мкртчян О.М. и др. (1965). Перспективы нефтеносности и направление геологопоисковых работ в Камско-Кинельской системе прогибов. *Геология нефти и газа*, 9, с. 1–7.
- Немова В.Д. (2021). Литогенетическая классификация пород и техноморфизм отложений баженовской свиты Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. *Дис. докт. геол.-мин. наук*. М: МГУ, 342 с.
- Прищепа О. М., Аверьянова О. Ю., Ильинский А. А., Морару Д. (2014). Нефть и газ низкопроницаемых сланцевых толщ – резерв сырьевой базы углеводородов России. СПб: ВНИГРИ, 323 с.
- Ступакова А.В., Калмыков Г.А., Коробова Н.И., Фадеева Н.П., Гатовский Ю.А., Суслова А.А., Сауткин Р.С., Пронина Н.В., Большакова М.А., Завьялова А.П., Чупахина В.В., Петракова Н.Н., Мифтахова А.А. (2017). Доманиковые отложения Волго-Уральского бассейна – типы разрезов, условия формирования и перспективы нефтегазоносности. *Георесурсы*. Спецвыпуск, с. 112–124. <http://doi.org/10.18599/grs.19.12>
- Ступакова А.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А., Богомолов А.Х., Кирюхина Т.А., Коробова Н.И., Шарданова Т.А., Суслова А.А., Сауткин Р.С., Полудеткина Е.Н., Козлова Е.В., Митронов Д.В., Коркоц Ф.В. (2015). Поисковые критерии нефти и газа в доманиковых отложениях

Волго-Уральского бассейна. *Георесурсы*, 2(61), с. 77–86. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.61.2.7>

Ульмишек Г.Ф., Шаломеев А.В., Холтон Д.Ю., Дахнова М.В. (2017). Нетрадиционные резервуары нефти в доманиковой толще Оренбургской области. *Геология нефти и газа*, 5, с. 67–77.

Ханин А.А. (1965). Основы учения о породах-коллекторах нефти и газа. М: Недра, 360 с.

Embry A.F. (1970). A Late devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. (Unpublished master's thesis). University of Calgary, Calgary, AB. <http://dx.doi.org/10.11575/PRISM/22817>

Сведения об авторах

Виталия Валерьевна Чупахина – сотрудник, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

Наталья Ивановна Коробова – ассистент, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

Георгий Александрович Калмыков – доктор геол.-мин. наук, профессор, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

Анна Петровна Завьялова – кандидат геол.-мин. наук, инженер, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

Михаил Юрьевич Карпушин – сотрудник, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

Кристина Андреевна Радченко – сотрудник, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

Статья поступила в редакцию 09.04.2022;

Принята к публикации 29.04.2022; Опубликована 16.05.2022

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Different types of void space and quality of unconventional reservoirs in the Upper Devonian domanic high-carbon deposits of Mukhanovo-Erokhovsky trough (Volga-Ural basin)

V.V. Chupakhina*, N.I. Korobova, G.A. Kalmykov, A.P. Zavyalova, M.U. Karpushin, K.A. Radchenko

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Vitaliya V. Chupakhina, e-mail: v.chupakhina@oilmsu.ru

Abstract. Domanic deposits have already been studied in sufficient details. Various aspects of their study were described previously in many works, but so far, these deposits have been considered mainly as source rocks. Domanic deposits are distributed in a wide stratigraphic range from the Middle Frasnian of the Late Devonian to the Tournaisian of the Early Carboniferous. In this paper, domanic formation is considered as an unconventional reservoir. Due to the

complex and heterogeneous structure of rocks, their uneven saturation with organic matter and low porosity values, the methodology for assessing reservoir properties is at a low stage of production. An integrated study of the void space in such deposits, including macro- and microdescription of the core, analytical studies, makes it possible to predict zones with best quality of reservoirs and helped successfully produce such deposits. In the section of domanic formation

were identified the main lithotypes and characterized of each of them. Comparison of the types of void space identified in thin sections and reservoir properties made it possible to classify the main types of reservoirs and assess their quality.

Keywords: domanic deposits, Mukhanovo-Erokhovskiy trough, Volga-Ural basin, void space, unconventional reservoir

Recommended citation: Chupakhina V.V., Korobova N.I., Kalmykov G.A., Zavyalova A.P., Karpushin M.U., Radchenko K.A. (2022). Different types of void space and quality of unconventional reservoirs in the Upper Devonian domanic high-carbon deposits of Mukhanovo-Erokhovskii trough. *Georesursy = Georesources*, 24(2), pp. 139–149. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.14>

References

- Bagrintseva K.I. (1999). Formation conditions and properties of oil and gas carbonate reservoirs. Moscow: RGGU, 285 p. (In Russ.)
- Balushkina N.S. (2012). Lithophysical typification and oil content of rocks of the Bazhenov horizon in the junction zone of the Surgut and Krasnoleninsky arches. *Cand. geol. and min. sci. diss.* Moscow: MSU, 163 p. (In Russ.)
- Bogorodskaya L.I., Kontorovich A.E., Larichev A.I. (2005). Kerogen. Methods of study, geochemical interpretation. Novosibirsk: SB RAS, Geo, 254 p. (In Russ.)
- Burlin Yu.K., Konyukhov A.I., Karnyushina E.E. (1991). Lithology of oil and gas bearing strata. Moscow: Nedra, 286 p. (In Russ.)
- Embry A.F. (1970). A Late devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. (Unpublished master's thesis). University of Calgary, Calgary, AB. <http://dx.doi.org/10.11575/PRISM/22817>
- Kalmykov G.A. (2016). The structure of the Bazhenov oil and gas complex as the basis for the forecast of differentiated oil productivity. *Dr. geol. and min. sci. diss.* Moscow: MSU, 391 p. (In Russ.)
- Khanin A.A. (1965). Fundamentals of the doctrine of reservoir rocks of oil and gas. Moscow: Nedra, 360 p. (In Russ.)
- Mirchink M.F., Khachatryan R.O., Mkrtchyan O.M. et al. (1965). Prospects for oil-bearing capacity and the direction of geological prospecting in the Kama-Kinel system of troughs. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil and Gas Geology*, 9, pp. 1–7. (In Russ.)
- Nemova V.D. (2021). Lithogenetic classification of rocks and technomorphism of the deposits of the Bazhenov formation of the West Siberian oil and gas province. *Dr. geol. and min. sci. diss.* Moscow: MSU, 342 p. (In Russ.)
- Prishchepa O. M., Aver'yanova O. Yu., Il'inskiy A. A., Morariu D. (2014). Oil and gas from low-permeability shale formations is a reserve of Russia's hydrocarbon resource base. St. Petersburg: VNIGRI, 323 p. (In Russ.)
- Stoupakova A.V., Kalmykov G.A., Korobova N.I., Fadeeva N.P., Gatovskiy Yu.A., Suslova A.A., Sautkin R.S., Pronina N.V., Bolshakova M.A., Zavyalova A.P., Chupakhina V.V., Petrakova N.N., Miftakhova A.A. (2017). Oil-Domantic deposits of the Volga-Ural basin – types of section, formation conditions and prospects of oil and gas potentia. *Georesursy = Georesources*. Special Issue, pp. 112–124. (In Russ.) <http://doi.org/10.18599/grs.19.12>
- Stoupakova A.V., Fadeeva N.P., Kalmykov G.A., Bogomolov A.Kh., Kiryukhina T.A., Korobova N.I., Shardanova T.A., Suslova A.A., Sautkin R.S., Poludetkina E.N., Kozlova E.V., Mitronov D.V., Korkots F.V. (2015). Criteria for oil and gas search in domanic deposits of the Volga-Ural basin. *Georesursy = Georesources*, 2(61), pp. 77–86. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.18599/grs.61.2.7>
- Ulmishek G.F., Shalomeenko A.V., Kholton D.Yu., Dakhnova M.V. (2017). Unconventional oil reservoirs in the Domanik formation of the Orenburg region. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil and Gas Geology*, 5, pp. 67–77. (In Russ.)
- Zavyalova A.P. (2021). Formation conditions and prospects for oil and gas potential of deposits of the domanic complex of the Francian-Tournaisian age of the Mukhanovo-Erokhov trough. *Cand. geol. and min. sci. diss.* Moscow: MSU, 163 p. (In Russ.)
- Zavyalova A.P., Chupakhina V.V., Stupakova A.V., Gatovskiy Yu.A., Kalmykov G.A., Korobova N.I., Suslova A.A., Bolshakova M.A., Sannikova I.A., Kalmykov A.G. (2018). Comparison of the Domanic outcrops in Volga-Ural and Timan-Pechora basins. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 6, pp. 57–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2018-6-57-73>

About the Authors

Vitaliya V. Chupakhina – Engineer, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University

1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Natalia I. Korobova – Assistant, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University

1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Georgy A. Kalmykov – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University

1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Anna P. Zavyalova – PhD (Geology and Mineralogy), Engineer, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University

1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Mikhail Y. Karpushin – Engineer, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University

1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Kristina A. Radchenko – Engineer, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University

1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Manuscript received 9 April 2022;

Accepted 29 April 2022; Published 16 May 2022