

Генетические типы пустотного пространства и закономерности их распределения в карбонатных природных резервуарах Тимано-Печорской провинции

Постников А.В.¹, Оленова К.Ю.¹, Сивальнева О.В.¹, Козионов А.Е.¹, Казимиров Е.Т.¹, Путилов И.С.^{2,3}, Потехин Д.В.^{2,3}, Саетгараев А.Д.⁴

¹РГУ (НИУ) нефти и газа имени И.М. Губкина, кафедра литологии, Москва, Россия, ²Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть», Пермь, Россия,

³ПНИПУ, Пермь, Россия, ⁴ООО «ЛУКОЙЛ-Коми», Усинск, Россия

egorcasual@yandex.ru

Аннотация

Одной из главных проблем нефтяной геологии и разработки является сложность в исследовании и моделировании неоднородности распределения пустотного пространства и его свойств в породах-коллекторах. Большое количество природных резервуаров со сложно построенным распределением коллекторских свойств, как правило, встречается в крупных карбонатных комплексах. На их формирование совместно влияют множество факторов, главными из которых являются тектонические процессы, палеогеографические условия, обстановки осадконакопления, особенности эволюции биологических сообществ (биоценозов), развитие вторичных (постседиментационных) процессов.

В статье рассматриваются региональные условия формирования карбонатных природных резервуаров Тимано-Печорской провинции (ТПП) для трех крупных нефтегазоносных комплексов: силурийско-нижнедевонского, верхнедевонско-турнейского и пермско-каменноугольного; освещаются результаты характеристики и сравнительного анализа пустотного пространства различных структурных компонентов пород для выявления закономерностей его формирования, пространственного распределения и свойств.

Материалы и методы

В рамках исследования по 15 скважинам из 9 месторождений проанализировано свыше 1 000 пластин керн и приуроченных к ним петрофизических цилиндров и шлифов с использованием методов оптической и электронной микроскопии, компьютерной рентгеновской томографии и имидж-анализа пустотного пространства (в прокрашенных шлифах). Исследования петрофизических цилиндров проводились в

ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». Остальные перечисленные исследования проводились на кафедре литологии в РГУ (НИУ) нефти и газа им. И.М. Губкина.

Ключевые слова

карбонатные природные резервуары, карбонатные породы-коллекторы, пустотное пространство, смачиваемость, Тимано-Печорская провинция, палеозой

Для цитирования

Постников А.В., Оленова К.Ю., Сивальнева О.В., Козионов А.Е., Казимиров Е.Т., Путилов И.С., Потехин Д.В., Саетгараев А.Д. Генетические типы пустотного пространства и закономерности их распределения в карбонатных природных резервуарах Тимано-Печорской провинции // Экспозиция Нефть Газ. 2022. № 1. С. **-**. DOI: 10.24412/2076-6785-2022-1-**-**

Поступила в редакцию: 01.11.2021

GEOLOGY

UDC 552.54 | Original Paper

Genetic void types and their distribution regularities in carbonate reservoirs of Timan-Pechora province

Postnikov A.V.¹, Olenova K.Yu.¹, Sivalneva O.V.¹, Kozionov A.E.¹, Kazimirov E.T.¹, Putilov I.S.^{2,3}, Potekhin D.V.^{2,3}, Saetgaraev A.D.⁴

¹Gubkin RSU of oil and gas, Department of lithology, Moscow, Russia, ²Department "LUKOIL-Engineering" LLC "PermRDineft", Perm, Russia, ³PNRPU, Perm, Russia,

⁴"LUKOIL-Komi" LLC, Uсинск, Russia

egorcasual@yandex.ru

Abstract

One of the main problems of petroleum geology and development is research and modeling of void space heterogeneity and its properties in the reservoir rocks. Carbonate deposits, as a rule, contain of reservoir rocks which have highly intricate structure and distribution of pore space. Their formation is influenced by many factors: tectonic processes, paleogeographic environments, depositional environments, evolution of biological communities (biocenoses), and the post-sedimentary processes.

The article discusses the regional factors of the Timan-Pechora province (TPP) for three large oil and gas complexes: the Silurian-Lower Devonian, Upper Devonian-Tournaisian and Permian-Carboniferous; highlights the results of the characteristics and comparative analysis of the void space in various structural components of rocks; identification of the spatial distribution patterns and properties of the void space

Materials and methods

In this study, were research over 1000 core plates in 15 wells from 9 fields. Associated with them petrophysical cylinders and thin sections were analyzed by using optical and electron microscopy, computed X-ray tomography and image analysis of void space (in stained thin sections). The studies of petrophysical cylinders were carried out at

"LUKOIL-Engineering" LLC. The rest of the listed studies were carried out at the Department of Lithology at the Gubkin RSU of oil and gas.

Keywords

carbonate reservoir, reservoir rocks, voids, wettability, Timan-Pechora province, paleozoic

For citation

Postnikov A.V., Olenova K.Yu., Sivalneva O.V., Kozionov A.E., Kazimirov E.T., Putilov I.S., Potekhin D.V., Saetgaraev A.D. Genetic void types and their distribution regularities in carbonate reservoirs of Timan-Pechora province. Exposition Oil Gas, 2022, issue 1, P. **–**. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2022-1-**-**

Received 01.11.2021

Введение

Данная работа является продолжением обобщения результатов предыдущих исследований на кафедре литологии [3, 5, 7, 10, 11, 13] по разрезам нижнедевонско-силурийского, верхнедевонского и нижнепермско-каменноугольного комплексов порядка 40 месторождений Ижма-Печорской, Печоро-Колвинской, Хорейверской, Варандей-Адзвинской нефтегазоносных областей. Параллельно ведутся подобные работы с уклоном в петрофизические исследования накопленного за последние десятилетия кернового материала [1, 8, 14].

Породы-коллекторы карбонатных отложений ТПП обладают очень высокой вещественной и структурной неоднородностью, что в целом характерно для крупных карбонатных нефтегазоносных комплексов. Вместе с тем рассматриваемые комплексы обладают рядом специфических черт, обусловленных палеотектоническими, палеогеографическими и эволюционно-биологическими факторами.

На протяжении всего палеозоя в пределах ТПП выдерживаются сходные палеоклиматические и палеотектонические условия. Осадконакопление проходило в условиях обширного мелководного шельфового бассейна, который раскрывался в Палеоуральский океан и с запада ограничивался слабо выраженными в рельефе складчатыми сооружениями Тимана [12], что определило незначительный объем поступления терригенного материала в среду седиментации. Такие условия с небольшими перерывами сохранялись на протяжении практически всего палеозоя, поэтому сформировался целый ряд общих черт, характерных для разновозрастных природных резервуаров. В связи с этим общность строения нефтегазоносных комплексов ТПП прослеживается в огромном стратиграфическом диапазоне: от силура до нижней перми [2, 4, 9].

Вместе с тем в пределах рассматриваемого региона сохраняется высокая локальная тектоническая неоднородность, которая и определила латеральную и вертикальную неоднородность комплексов. Вследствие чего на приподнятых (приразломных) участках морского дна формировались многочисленные (часто высокоамплитудные) органогенные постройки, которые были окружены относительно глубоководными участками депрессионных зон. Эвстатические колебания уровня Мирового океана и, возможно, локальная блоковая геодинамика приводили к периодическому выводу формировавшихся построек выше уровня моря или, напротив, их погружению, что и определяло высокую неоднородность коллекторских свойств резервуаров на всех иерархических уровнях: от макроуровня, отражающего строение резервуара в целом, до микроуровня, определяемого структурными соотношениями породообразующих компонентов.

Существенное влияние на свойства и вертикальную структурную неоднородность карбонатных комплексов ТПП оказала эволюция биоценозов, которая во многом определила особенности строения органогенных

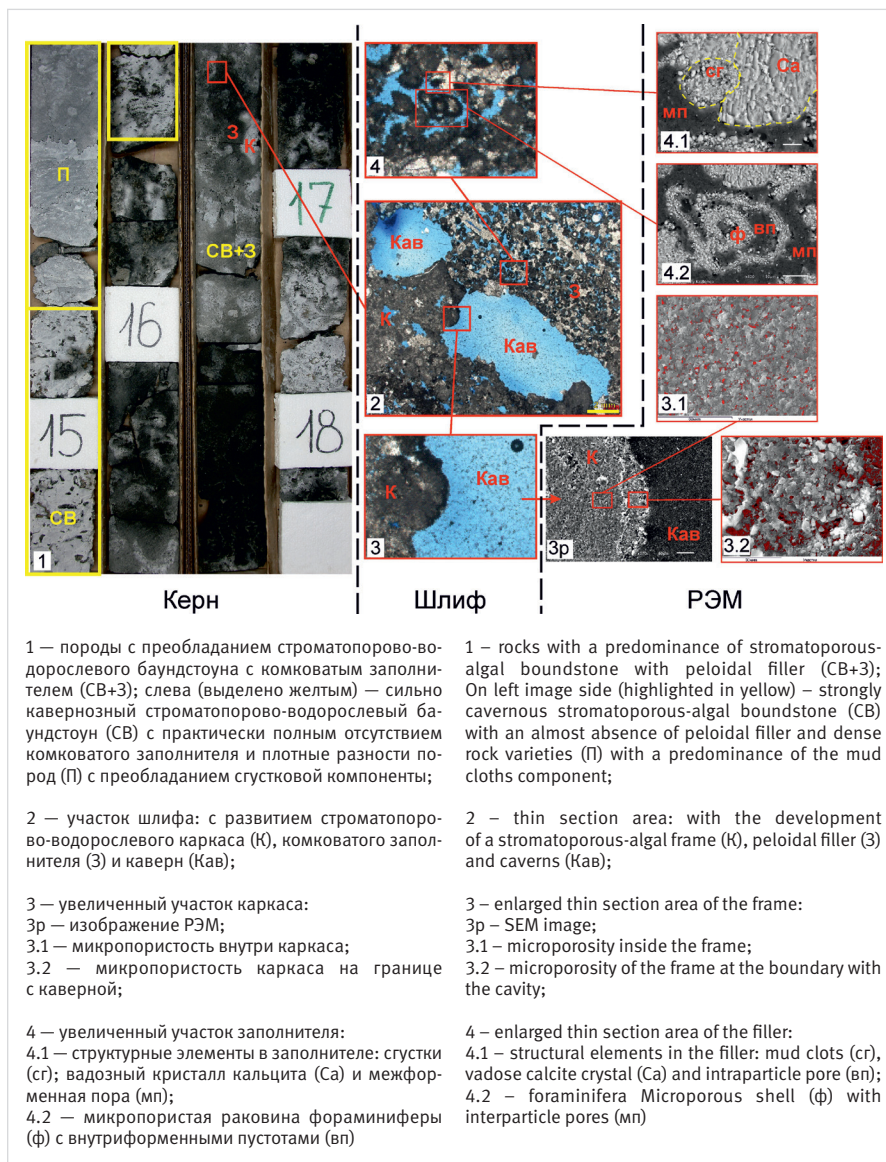


Рис. 1. Схема иерархии пустотного пространства «керн-шлиф-РЭМ» фамениских отложений (D3fm)

Fig. 1. Scheme of void space hierarchy "core-thin section-SEM" in the Famenian deposits (D3fm)

построек на разных стратиграфических уровнях.

Формирование неоднородности имело ярко выраженный стадийный характер. Ее основные черты складывались на стадии седиментогенеза, но существенные изменения происходили в процессе диагенеза осадков и при их последующем катагенезе.

В результате сочетания рассмотренных факторов устанавливаются качественные различия для силурийско-нижнедевонского, верхнедевонско-турнейского и пермско-каменноугольного комплексов отложений.

Факторы организации пустотного пространства

Неоднородность пустотного пространства можно охарактеризовать как комбинацию разномасштабных элементов, каждый из которых обладает присущими им свойствами

и морфологией пустотного пространства. Их последовательное сочетание позволило выстроить иерархические фильтрационные системы для природных резервуаров. Каждый из иерархических уровней может быть охарактеризован разным набором литолого-петрофизических исследований.

Для выделенных четырех иерархических уровней определены основные факторы организации пустотного пространства.

- Структурный уровень — характеризует структуру пустотного пространства. Его можно разделить на два подуровня по методам исследований:
 - подуровень микроструктурных элементов различного генезиса и связанной с ними микропористости. Могут быть охарактеризованы методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), компьютерной томографии (высокого уровня

Табл. 1. Факторы, определяющие генетические типы пустотного пространства
Tab. 1. Factors determining the genetic types of void space

Факторы	Основные процессы	Формируемое пустотное пространство
Седиментационные (первичные)	Накопление граноморфного материала	Межформенное
		Внутриформенное
		Микропористое
	Накопление карбонатного ила (сгустков)	Микропористое
	Рост каркасных построек	Внутрикаркасное
Вторичные	Биотурбация	
	Синерезис, усыхание	Трещинное
		Межкристаллическое
	Цементация (в т.ч. спаритизация) и перекристаллизация	Внутрикристаллическое
		Пустоты выщелачивания (в т.ч. каверны)
	Выщелачивание	Вместоформенное
		Внутрикристаллическое
	Грануляция/микритизация	Микропористое
	Доломитизация	Межкристаллическое
		Внутрикристаллическое
	Засолонение (сульфатизация, галитизация и пр.)	Межкристаллическое
	Трещинообразование	Трещинное
	Стилолитизация	
Катагенетические	Цементация	Межкристаллическое
		Внутрикристаллическое
	Выщелачивание	Пустоты выщелачивания (в т.ч. по трещинам)

разрешения) и ядерно-магнитного резонанса (ЯМР);

- подуровень относительно крупных элементов матрицы пород и сопряженных с ними пор и мелких каверн. Изучается методами оптической микроскопии, компьютерной томографии (невысокого разрешения), исследованиями стандартных петрофизических цилиндров и ЯМР.
- Текстурный уровень — включает в себя различные структурные элементы, обладающие своеобразием свойств и морфологии пустотного пространства. Такие соотношения устанавливаются на уровне оптической стереомикроскопии, анализа макроизображений ядра, редко — компьютерной томографии. Литотип, заключающий в себе геометрию

пространственного распределения автохтонных и аллохтонных структурных элементов, характеризуется на структурном и текстурном уровне исследований.

- Уровень пласта-коллектора (макроуровень) — характеризует неоднородность распространения фильтрационно-емкостного пространства в пределах породных ассоциаций (сочетаний литотипов). При изучении макроуровня фильтрационно-емкостного пространства, помимо литологических методов, существенную роль играют методы геофизических исследований скважин (ГИС) и в отдельных случаях сейсморазведки.
- Уровень природного резервуара — характеризуется распределением пластов-коллекторов (других породных

ассоциаций, таких как циклиты и сиквенсы) и зон трещиноватости в пространстве. Крупные природные резервуары, связанные с большими биогермными массивами, рифами, часто имеют в своем строении целый комплекс породных ассоциаций, приуроченных к разным стратиграфическим уровням. Тем не менее такой резервуар в целом представляет единый нефтегазоносный объект, гидродинамическая и фильтрационно-емкостная системы которого имеют ряд общих черт. Часто такой резервуар не может быть охарактеризован непрерывным отбором ядра ни в одной скважине, и тогда на первый план при его исследовании выступают данные ГИС и сейсморазведки. Пространственные и вещественные неоднородности резервуара могут быть установлены только по его аналогам в естественных обнажениях.

В данной работе рассматриваются результаты исследований породных уровней (текстурного и в основном структурного уровня организации пустотного пространства) на основе методов оптической (с использованием микроскопов Axio Scope 40, Axio Imager A2M, Carl Zeiss GmbH) и электронной микроскопии (JSM 6610 LV, Jeol (Япония), с помощью энергодисперсионного спектрометра IE350 (OXFORD INSTRUMENTS, Великобритания), имидж-анализа пустотного пространства в прокрашенных шлифах (Axio Vision Software, Adobe PhotoShop CC), компьютерной рентгеновской томографии (DeskTom 130, RX Solutions), петрофизических исследований (стандартными методами исследования петрофизических цилиндров) и макроанализа ядра (анализ пластин ядра на стереомикроскопах Axio Zoom V16, Carl Zeiss GmbH, анализ фотографий ядра) (рис. 1).

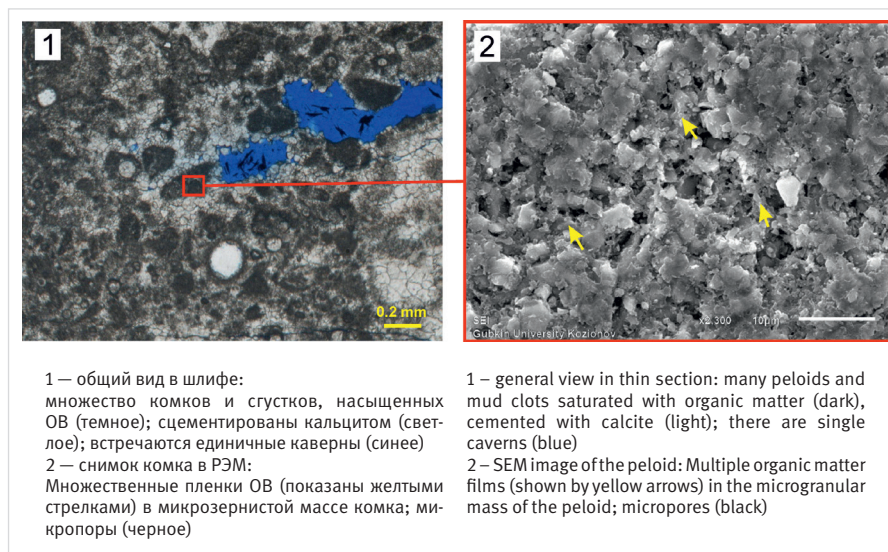


Рис. 2. Сферово-водорослевый известняк (D3fm)
Fig. 2. Sphere-algae limestone (D3fm)

На структурном уровне ключевыми являются генетические факторы, определяющие типы пустотного пространства (табл. 1). Тем не менее в карбонатных отложениях важно выявить фактор распределения органического вещества (ОВ), который может предопределить поверхностные свойства стенок пор и каналов.

Распределение органического вещества

Поверхность пустотного пространства карбонатных пород-коллекторов ТПП по своей сути является кристаллической, так как сложена преимущественно кристаллами карбонатных минералов. Однако их природа может быть различной. Некоторые биохомогенные кристаллы (в частности, бактериальной природы) могут заключать внутри себя и/или между собой органическое вещество *in situ* (рис. 2). В связи с этим поверхность, как и матрицу породы в целом, стоит называть органоминеральной.

Кристаллы хомогенного генезиса, свободно растущие в пустотном пространстве, являются относительно «чистыми», так как не содержат примесей ОВ. К ним можно отнести, например, кристаллы вадозного кальцита или кристаллы ангидрита. Кристаллы, формирующие поверхность, могут отличаться между собой морфологией, что определяет степень ее изрезанности (в т.ч. извилистости/гладкости и т.д.). Микропористые участки часто сорбируют миграционное ОВ, тем самым меняя поверхностные свойства на границе с крупными пустотами. Таким образом, зная характер органоминеральной поверхности (рис. 3), можно прогнозировать ее поверхностные свойства (в т.ч. смачиваемость).

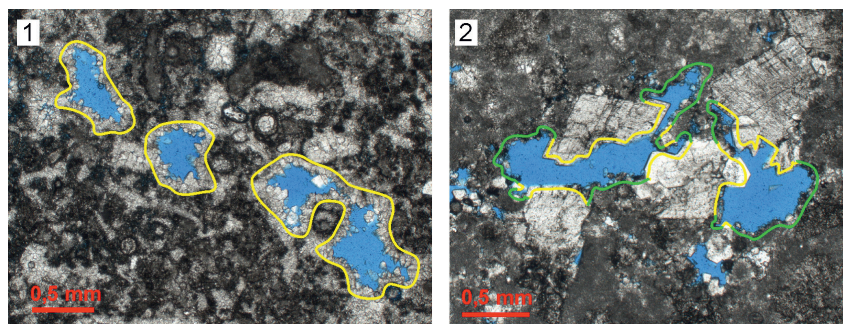
Авторами выдвигается предположение, что микрозернистые поверхности в матрице породы, насыщенные ОВ, могут гидрофобизировать/олеофобизировать пустотное пространство, а янокристаллические, наоборот, гидрофилизировать/олеофобизировать.

Седиментогенез

На этапе седиментогенеза формируется первичное пустотное пространство пород за счет роста каркасных построек, накопления граноморфного материала и/или карбонатного ила в пространстве между постройками (межкаркасное заполнение [6]) и в виде отдельных толщ.

Эволюция биоценозов определяет тип каркаса и геометрию первичного пустотного пространства. Общие черты рассматриваемых отложений обусловлены повсеместным присутствием цианобактериальных сообществ. Особенно ярко это выражено в силурийско-нижнедевонское время, когда цианобактерии почти полностью определяли формирование каркасных построек. Однако во франское и спорадически в фаменское время уже значительную роль приобретают строматопороидеи, а в пермско-каменноугольное время произошел расцвет таких каркасообразующих организмов, как палеоаплизины, мшанки, известковые водоросли и микрокодии.

Морфологически выраженные органо-генные постройки часто сопровождались накоплением слоев грейнстоунов, структура которых определяется составом биоценоза. В силурийско-нижнедевонском и верхнедевонско-турнейском комплексах подобные толщи развиты слабо. Их широкое развитие происходит в пермско-каменноугольном комплексе. Это, по-видимому, связано с появлением биоценозов, включающих различные

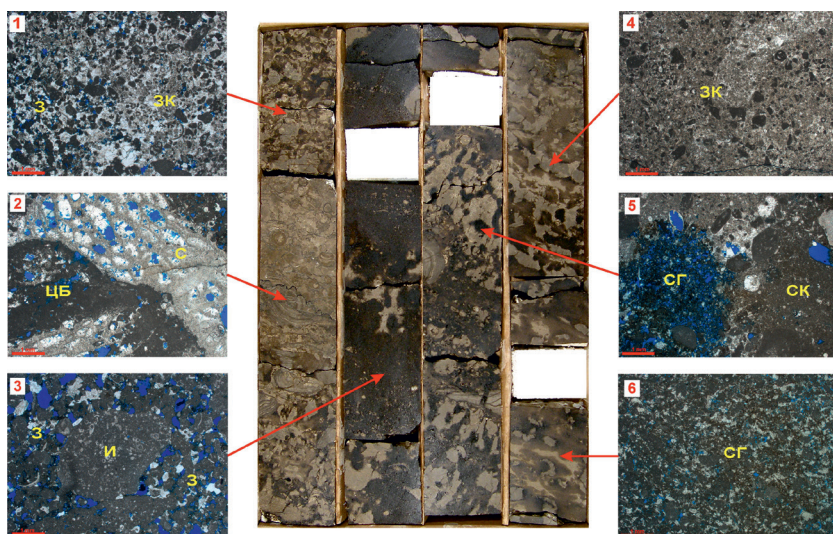


1 — микрозернистые разновидности, насыщенные ОВ (темное) изолированы от поверхности пустот вторичным кристификационным кальцитовым цементом (оконтурено желтым)
2 — первичные микрозернистые органоминеральные элементы каркаса формируют поверхность каверны (оконтурено зеленым) наравне со вторичными крупнокристаллическими кальцитом и доломитом (подчеркнуто желтым)

1 — microgranular varieties saturated with organic matter (dark) are isolated from the voids surface by secondary crustificatory calcite cement (outlined in yellow)
2 — primary microgranular organomineral framework elements form the cavity surface (outlined in green) along with secondary coarse-grained calcite and dolomite (underlined in yellow)

Рис. 3. Характер поверхности стенок пустот в строматопорово-водорослевом баундстоуне (D3fm)

Fig. 3. The voids surface characteristic in the stromatoporous-algal boundstone (D3fm)



1 — комковато-водорослевый заполнитель (3) с межформенным типом пустот вокруг слабообразованного, но плотного зеленоводорослевого каркаса (3К)
2 — внутрикаркасные поры в строматопоре (С), перекрывающей слабо выщелоченную сгустковую цианобактериальную массу (ЦБ)
3 — умеренно выщелоченный интракlastово-комковатый заполнитель с межформенной пористостью: в комковатой массе заполнителя (3) наблюдаются крупные интракlastы (И)
4 — плотный зеленоводорослевый каркас (3К)
5 — выщелачивание комковато-сгусткового заполнителя (СГ) с образованием множества мелких пустот; цианобактериальный сгустковый каркас (СК) практически не затронут выщелачиванием
6 — комковато-сгустковый заполнитель: мелкие поры (синие) и микропористые участки, насыщенные ОВ (коричневое)
Масштабная линейка — 1 мм

1 — peloidal-algal filler (3) with interparticle voids around an underdeveloped but dense green algae frame (3K)
2 — intraframework voids in stromatopore (C) overlying weakly leached clotted cyanobacterial mass (ЦБ)
3 — moderately leached intraclast-peloidal filler with interparticle porosity: large intraclasts (И) are observed in the mass of peloidal filler (3)
4 — dense green algae frame (3K)
5 — Leaching of peloidal-clotted filler (CF) with the formation of multiple small pores; the cyanobacterial clotted frame (CK) is practically unaffected by leaching
6 — peloidal-clotted filler: small pores (blue) and microporous areas saturated with organic matter (brown)
Scale bar - 1 mm

Рис. 4. Неоднородность распределения заполнения и каркасов в керне с различным пустотным пространством (синее) в шлифах (D3fm)

Fig. 4. Heterogeneity distribution of fillers and frames in the core with different void space (blue) in thin sections (D3fm)

виды мшанок и криноидей, скелеты которых часто подвергались разрушению вследствие активной гидродинамики среды и устойчивого сноса в пределах распространенных в то время малоамплитудных построек.

В силурийско-нижнедевонском и верхнедевонско-турнейском комплексах слабое распространение толщ грейнстоунов компенсировалось развитием межкаркасного граноморфного заполнения как результата жизнедеятельности цианобактерий. Этот материал представляет собой многочисленные комки и интракласты. Большинство комков и некоторые виды интракластов в пермско-каменноугольном комплексе представлены преимущественно гранулированным органоминеральным детритом.

Большая часть эффективной емкости исследуемых природных резервуаров обычно приурочена к пустотному пространству граноморфного межкаркасного заполнения, толщ грейнстоунов и в меньшей степени каркасных построек.

Для граноморфного межкаркасного заполнения и толщ грейнстоунов характерны межформенный и внутриформенный тип пустот, морфология которых сильно зависит от степени сортировки и разнообразия структурных компонент: комков, интракластов, биофрагментов и литокластов (рис. 4 (1, 3)).

Многие комки и интракласты сложены микроструктурированным кальцитом и являются микropористыми. Межформенный тип пустот преобладает, внутриформенный может быть резко ограничен. Некоторые внутриформенные пустоты фильтрационно не связаны с внешним пустотным пространством.

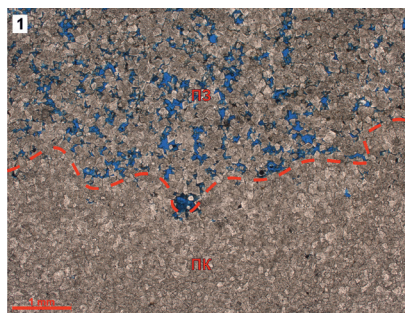
Для густкового межкаркасного заполнения основным типом пустотного пространства является микropористость. Чем выше доля густковой компоненты в граноморфной массе, тем меньше размер межформенных и внутриформенных пор, вплоть до их исчезновения (рис. 4 (5, 6)).

Для каркасных построек характерна внутрикарасная пористость, структурный вид которой зависит от каркасообразующих организмов. Конфигурация и распространение каркаса контролируются палеогеографическими условиями, что определяет формирование текстуры фильтрационного пространства в системе каркас-заполнитель (рис. 4).

Основу пустотного пространства микробных построек составляют как фенестры и пустоты типа птичьих глазок (stromatolites), так и микropористость (размер пор не превышает 5 мкм) в густках (рис. 4 (2, 5)), корках и различных колониальных формах. В строматолитоидных известняках проницаемость или связность пустот, как правило, выше по латерали и резко ниже (вплоть до отсутствия) по вертикали.

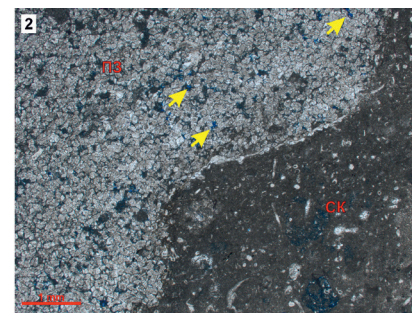
Пустотное пространство каркасов рифостроителей, таких как мшанки, строматопоры (рис. 4 (2)), кораллы и некоторые известковые губки, имеет упорядоченную пористую структуру. Первичное пустотное пространство в палеоаплизах представлено микropорами, но может быть резко увеличено вторичными процессами.

Зеленоводорослевый каркас обычно не имеет эффективного пустотного пространства. Чехлы зеленых водорослей, быстро обызвестляясь, практически полностью цементируют пространство между собой (рис. 4 (4)). Первичная пористость в таких каркасах может быть представлена редкой межформенной и внутриформенной пористостью карбонатного осадка.



1 — полная доломитизация биогермного известняка. Наблюдается плотный перекристаллизованный каркас (ПК) и пористый перекристаллизованный заполнитель (ПЗ) с межкристаллическим типом пустот, граница между ними выделена красным пунктиром

2 — частичная доломитизация в биогермном густковом известняке с комковато-густковым заполнителем: заполнитель (ПЗ) практически полностью перекристаллизован, в то время как цианобактериальный густковый каркас (СК) доломитизацией не затронут. В заполнителе присутствуют немногочисленные тонкие поры (желтые стрелки), пространство каркаса преимущественно микropористое и насыщено ОВ



1 — complete dolomitization of bioherm limestone. A dense recrystallized frame (PK) and a porous recrystallized filler (P3) with an intercrystalline type of voids are observed, the boundary between them is highlighted by a red dotted line

2 — partial dolomitization in bioherm clotted limestone with peloidal-clotty filler: the filler (P3) is almost completely recrystallized, while the cyanobacterial clotted frame (CK) is not affected by dolomitization. The aggregate contains a few thin pores (yellow arrows), the framework space is predominantly microporous and saturated with organic matter

Рис. 5. Процессы доломитизации в известняках (D3fm)
Fig. 5. Dolomitization processes in limestones (D3fm)

В пространстве между чехлами филоидных водорослей и скелетов некоторых типов мшанок могут формироваться крупные пустоты.

Микрокодиевые образования являются спорными с точки зрения их генезиса, однако имеют текстурные особенности, схожие с некоторыми каркасными постройками, поэтому могут быть условно отнесены к каркасным. Пустотное пространство в данных образованиях преимущественно отсутствует.

Процессы биотурбации развиваются, как правило, в низкопористых густковых и густково-глинистых отложениях, в результате чего не оказывают существенного влияния на распределение пустотного пространства.

Диагенез

На этапе диагенеза первичную пористость пород в основном изменяют такие процессы, как цементация, выщелачивание и доломитизация.

Процессы цементации приводят к уменьшению первичного пустотного пространства и его фильтрационной способности. Тем не менее новообразованные кристаллы могут изолировать поверхности структурных элементов, содержащих ОВ, тем самым меняя поверхностные свойства органоминеральной матрицы (рис. 3).

Активное развитие первичной морской цементации иногда полностью заливает пустотное пространство. Данный процесс может развиваться настолько интенсивно, что целые резервуары полностью лишаются пустотного пространства, несмотря на морфологическую выраженность постройки.

Процессы выщелачивания, наоборот, увеличивают пустотное пространство, но вместе с этим могут обнажать поверхности структурных элементов, содержащих ОВ. Выщелачивание происходит при выведении накопленных отложений выше уровня моря. Вместе с тем происходят процессы вадозной цементации и появления пресноводно-фреатических зон.

Процессы грануляции и микритизации преобразуют кристаллические скелетные остатки организмов в микроструктурированную массу, формируя микropористые участки, к которым часто тяготеет миграционное ОВ. Процессы перекристаллизации, наоборот, преобразуют микроструктурированные участки в кристаллические, снижая долю микropористости, при этом вытесняя и/или консервируя находящееся в ней ОВ.

Трещины синерезиса развиваются преимущественно по плотным участкам каркаса и становятся причиной частичного или полного разрушения каркаса и его перехода в интракластовую компоненту заполнителя. Данные трещины имеют сообщение с заполнителем, увеличивая общую эффективную емкость коллектора, но могут быть полностью залечены вторичными процессами.

При полной и интенсивной доломитизации первичных известняков новообразованное межкристаллическое пустотное пространство, как правило, наследует текстуру первичного (рис. 5 (1)). Ввиду этого многие первично пористые известняки перекристаллизуются в пористые доломиты со схожим распределением пустот и с относительным сохранением их первоначального размера. ОВ при этом может быть заключено внутри и/или между новообразованными кристаллами доломита. Однако при последующем наложении процессов выщелачивания и цементации первичное распределение пустот может нарушаться.

В пределах каркаса и заполнения процессы диагенеза могут протекать с различной интенсивностью. К примеру, при частичной доломитизации в водорослевых известняках пространство заполнителя, как правило, доломитизируется полностью, а каркаса часто остается нетронутым (рис. 5 (2)). При выщелачивании в водорослевых известняках самые крупные пустоты (в т.ч. каверны) формируются преимущественно в пограничной зоне между каркасом и заполнителем.

Процессы засоления снижают эффективную пористость пород.

Одним из существенных вторичных процессов, повлиявших на структуру пустотного пространства, является доломитизация. Она наиболее интенсивно (часто регионально) проявлена в силурийско-нижнедевонском комплексе, спорадически в верхнедевонско-турнейском и незначительно в пермско-каменноугольном. Это, по-видимому, связано с периодически возникавшим частичным изолированием бассейна седиментации от океана в целом или в локальных зонах и на отдельных участках. Верхнедевонские и пермско-каменноугольные бассейны осадконакопления имели хорошее сообщение с водами Мирового океана, что способствовало развитию биоценозов и низкой степени доломитизации.

Катагенез

На этапе катагенеза формируются многочисленные стилолитовые швы и участки стилолитизации. Крупные и протяженные субгоризонтальные стилолитовые швы могут являться локальным флюидоупором и уменьшать вертикальную фильтрационную способность коллекторов. Тектонические процессы могут формировать также наклонные и субвертикальные стилолитовые швы, уменьшая фильтрационную способность в перпендикулярных к их простиранию направлениях.

В пределах развития участков стилолитизации, в которых формируются множественные затухающие тонкие стилолитовые швы, уменьшается размер пор. Высвобождающееся из органоминеральной матрицы ОВ концентрируется на подобных участках, меняя первичные поверхностные свойства в их пределах.

Формирование трещиноватости, как правило, приурочено к плотным литотипам. За счет этого могут связываться в единую фильтрационную систему различные коллекторские толщи, отделенные друг от друга непроницаемыми отложениями. В этой связи для трещинообразования важно не столько появление нового емкостного пространства, сколько появление новых фильтрационных путей. Как и в случае с выщелачиванием, трещины могут вскрывать структурные элементы, содержащие ОВ. Ввиду этого поверхностные свойства трещин могут резко отличаться от поверхностных свойств пустотного пространства коллекторских толщ.

Процессы выщелачивания и цементации в катагенезе приводят к тем же последствиям, что и в диагенезе (соответственно увеличивают или уменьшают эффективное пустотное пространство, меняют свойства органоминеральной поверхности). Тем не менее они связаны с более глубинными процессами (к примеру, с гидротермальным выщелачиванием по трещинам в некоторых нижнедевонских отложениях) и могут полностью изменить первичный облик пород, развиваясь более интенсивно.

Итоги

Неоднородность фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) карбонатных природных резервуаров определяется иерархической структурой порово-кавернового и трещинного пространства, его текстурой и характером выполнения фильтрационных каналов, определяемым структурными элементами пород различной степени преобразованности вторичными процессами. Исследование факторов организации пустотного пространства литолого-петрофизическими методами на породном уровне выступает основой для исследований на более крупных иерархических уровнях.

Выводы

Таким образом, закономерности развития тектонических процессов, палеогеографических условий, эволюции и массовых вымираний биоценозов, интенсивности и направленности диагенетических и катагенетических процессов предопределили распределение карбонатных природных резервуаров в пространстве и характер их сложно построенного пустотного пространства. Для выявления данных закономерностей и неоднородностей необходимы, несмотря на трудозатраты, полноценные и комплексные литолого-петрофизические, геолого-геофизические и геохимические методы исследований.

Оценка совокупности седиментационных, вторичных и тектонических факторов, определяющих формирование природных резервуаров, даст возможность точнее прогнозировать запасы углеводородов, пути и интенсивность их фильтрации. Это позволит построить на их основе объективные геологические и фильтрационные модели для более эффективного планирования методов поиска и добычи углеводородов.

Литература

1. Дьяконова Т.Ф., Бата Л.К., Саэтгараев А.Д., Бронскова Е.И. Геологические факторы и диагностические признаки пород с негидрофильной смачиваемостью на месторождениях Тимано-Печорской провинции // Каротажник. 2021. № 1. С. 19–30.
2. Жемчугова В.А. Седиментационная цикличность и углеводородная продуктивность карбонатных комплексов палеозоя Печорского нефтегазоносного бассейна // II Всероссийское литологическое совещание «Литология и нефтегазоносность карбонатных отложений». Сыктывкар. 2001. 5–7 июня. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 138–139.
3. Мусихин А.Д. Литология и прогноз пространственного распространения пород-коллекторов фаменских нефтегазоносных отложений восточной части Центрально-Хорейверского уступа: диссертация. М.: 2016. 26 с.
4. Никонов Н.И., Богацкий В.И., Мартынов А.В., Ларионова З.В., Ласкин В.М. и др.

Тимано-Печорский седиментационный бассейн. Ухта: ТП НИЦ, 2002. 122 с.

5. Оленова К.Ю. Литология и природные резервуары нижнепермских карбонатных отложений северной части колвинского мегавала: автореферат М.: 2011. 28 с.
6. Оленова К.Ю., Постников А.В. Проблемы типизации известняков в нефтегазовой литологии // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. Материалы VII Всероссийского литологического совещания. Новосибирск. 2013. 28–31 октября. Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2013. Т. 2. С. 341–346.
7. Осинцева Н.А. Литология, фации и коллекторские свойства верхнедевонских отложений центральной части Хорейверской впадины в связи с перспективами их нефтегазоносности: диссертация. М.: 2013. 144 с.
8. Путилов И.С., Чижов Д.Б., Гурбатова И.П., Неволин А.И. Особенности проведения лабораторных исследований негидрофильных пород-коллекторов // Известия ТПУ. 2021. Т. 332. № 4. С. 70–79.
9. Пармузина Л.В. Верхнедевонский комплекс Тимано-Печорской провинции (строение, условия образования, закономерности размещения коллекторов и нефтегазоносность). СПб.: Недра, 2007. 151 с.
10. Постников А.В., Сивальнева О.В., Постникова О.В., Потехин Д.В., Путилов И.С., Саэтгараев А.Д., Оленова К.Ю. Литолого-петрофизическая неоднородность карбонатных резервуаров Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. 2021. № 4. С. 5–20.
11. Сивальнева О.В. Реконструкция условий формирования и закономерности пространственного распределения пород-коллекторов нижнедевонских нефтегазоносных отложений северо-восточной части Хорейверской впадины: диссертация. М.: 2015. 94 с.
12. Тимонин Н.И. Печорская плита: История геологического развития в фанерозое: автореферат. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 1998. 48 с.
13. Журавлева Л.М. Литология и типы пустотного пространства карбонатных отложений овинпармского горизонта (Варандей-Адзвинская зона Тимано-Печорской НГП): автореферат. М.: 2014. 26 с.
14. Юрьев А.В. Совершенствование методов определения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов с применением полноразмерного ядра (на примере ряда месторождений севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции): автореферат. Пермь: 2020. 19 с.

ENGLISH

Results

The heterogeneity of filtration-volumetric parameters in carbonate reservoirs is determined by the hierarchical structure of the porous-cavity and fractured space, its texture and complex types of filtration channels, determined by the rocks structural elements of varying transformation degrees by postsedimentary processes. The study of void space

organization factors by lithological and petrophysical methods at the rock level is the basis for studies at larger hierarchical levels.

Conclusions

Thus, the patterns of tectonic processes, paleogeographic conditions, evolution and mass extinctions of biocenoses, the intensity and direction

of postsedimentary processes predetermined the distribution of carbonate reservoirs in space and the nature of their complexly constructed void space. To identify these patterns and heterogeneities, despite the labor costs, full-fledged and complex lithological-petrophysical, geological-geophysical and geochemical research methods are necessary. An assessment of the totality of sedimentation, secondary and

tectonic factors that determine the formation of carbonate reservoirs will make it possible to more accurately predict hydrocarbon reserves, the ways and intensity of their filtration. This will make it possible to build on their basis objective geological and filtration models for more efficient planning of methods for the search and production of hydrocarbons.

References

1. Dyakonova T.F., Bata L.K., Saetgaraev A.D., Bronskova E.I. Geological factors and diagnostic signs of non-water-wetting rocks in Timan-Pechora province fields. Karotazhnik, 2021, issue 1, P. 19–30. (In Russ).
2. Zhemchugova V.A. Sedimentation cyclicity and hydrocarbon productivity of Paleozoic carbonate complexes of the Pechora oil and gas bearing basin. II All-Russian lithological meeting "Lithology and oil and gas content of carbonate deposits". Syktyvkar, 2001, June 5–7. Syktyvkar: Geoprint, 2001, P. 138–139. (In Russ).
3. Musikhin A.D. Lithology and forecast of the spatial distribution of reservoir rocks of the Famennian oil and gas deposits in the eastern part of the Central Khoreyver ledge. Moscow: 2016, 26 p. (In Russ).
4. Nikonov N.I., Bogatsky V.I., Martynov A.V., Larionova Z.V., Laskin V.M. et al. Timan-Pechora sedimentary basin. Ukhta: TP NITS, 2002, 122 p. (In Russ).
5. Olenova K.Yu. Lithology and natural reservoirs of the Lower Permian carbonate deposits of the northern part of the Kolva megaswell: Author's abstract. Moscow: 2011, 28 p. (In Russ).
6. Olenova K.Yu., Postnikov A.V. Classification problems of limestones in oil and gas lithology. Sedimentary basins, sedimentary and post-sedimentary processes in geological history. Proceedings of the VII All-Russian Lithological Meeting. Novosibirsk, 2013, October 28–31. Novosibirsk: INGG SB RAS, 2013, Vol. 2, P. 341–346. (In Russ).
7. Osintseva N.A. Lithology, facies and reservoir properties of the Upper Devonian deposits of the central part of the Khoreyver depression in connection with the prospects for their oil and gas potential: author's abstract. Moscow: 2013, 144 p. (In Russ).
8. Putilov I.S., Chizhov D.B., Gurbatova I.P., Nevolin A.I. Specific features of laboratory studies of non-hydrophilic rocks-reservoirs. Bulletin of the Tomsk polytechnic university, 2021, Vol. 332, issue 4, P. 70–79. (In Russ).
9. Parmuzina L.V. Upper Devonian complex of the Timan-Pechora province (structure, conditions of formation, patterns of reservoir location and oil and gas content). St. Petersburg: Nedra, 2007, 151 p. (In Russ).
10. Postnikov A.V., Sivalneva O.V., Postnikova O.V., Potekhin D.V., Putilov I.S., Saetgaraev A.D., Olenova K.Yu. Lithological and petrophysical heterogeneity of carbonate reservoirs of timan-pechora oil and gas province. Proceedings of Gubkin Russian State University of oil and gas, 2021, issue 4, P. 5–20. (In Russ).
11. Sivalneva O.V. Reconstruction of the conditions of formation and regularities of the spatial distribution of reservoir rocks of the Lower Devonian oil and gas deposits of the northeastern part of the Khoreyver depression: author's abstract. Moscow: 2015, 94 p. (In Russ).
12. Timonin N.I. The Pechora plate: History of geological development in the Phanerozoic: autor's abstract. Syktyvkar: Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Department of the Russian Academy of Sciences, 1998, 48 p. (In Russ).
13. Zhuravleva L.M. Lithology and void space types of carbonate deposits of the Ovinparmsky horizon (Varandey-Adzinskaya zone of the Timan-Pechora oil and gas province): author's abstract. Moscow: 2014, 26 p. (In Russ).
14. Yuriev A.V. Improving the methods for determining the porosity and reservoir properties of reservoir rocks using a full-sized core (on the example of a number of fields in the north of the Timano-Pechora oil and gas province): author's abstract. Perm: 2020, 19 p. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Постников Александр Васильевич, д.г.-м.н., заведующий кафедрой литологии РГУ (НИУ) нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия

Оленова Ксения Юрьевна, к.г.-м.н., инженер кафедры литологии РГУ (НИУ) нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, Россия

Сивальнева Ольга Владимировна, к.г.-м.н., доцент кафедры литологии РГУ (НИУ) нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия

Козионов Артем Евгеньевич, ассистент кафедры литологии РГУ (НИУ) нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия

Казимиров Егор Тимурович, аспирант кафедры литологии РГУ (НИУ) нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия
Для контактов: egorcasual@yandex.ru

Путилов Иван Сергеевич, заместитель директора филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» по научной работе в области геологии, доцент ПНИПУ кафедры ГНГ, Пермь, Россия

Потехин Денис Владимирович, начальник управления подсчета запасов УВС, доцент ПНИПУ, Пермь, Россия

Саегаев Амир Дамирович, заместитель генерального директора по геологии и разработке месторождений, главный геолог ООО «ЛУКОЙЛ-Ками», Усинск, Россия

Postnikov Alexander Vasilyevich, doctor of geological mineralogical sciences, head of the department of lithology, Gubkin RSU of oil and gas, Moscow, Russia

Olenova Ksenia Yuryevna, candidate of geological mineralogical sciences, engineer of the department of lithology of Gubkin RSU of oil and gas, Moscow, Russia

Sivalneva Olga Vladimirovna, candidate of geological mineralogical sciences, associate professor of the department of lithology of Gubkin RSU of oil and gas, Moscow, Russia

Kozionov Artem Evgenievich, assistant of the department of lithology of Gubkin RSU of oil and gas, Moscow, Russia

Kazimirov Egor Timurovich, postgraduate student, department of lithology of Gubkin RSU of oil and gas, Moscow, Russia
Corresponding author: egorcasual@yandex.ru

Putilov Ivan Sergeevich, assistant director of the department for scientific work in the field of geology, department of "LUKOIL-Engineering" LLC "PermNIPIneft", associate professor of PNRPU, Perm, Russia

Potekhin Denis Vladimirovich, head of the department for estimating hydrocarbon reserves, associate professor of PNRPU, Perm, Russia

Saetgaraev Amir Damirovich, assistant general director for geology and field development, chief geologist of "LUKOIL-Komi" LLC, Uсинск, Russia