

DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/32_2020

УДК 552.121:552.54(470.1)

Даньщикова И.И., Майдль Т.В., Журавлев А.В.

Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), Сыктывкар, Россия, iidanshikova@geo.komisc.ru, maydl@geo.komisc.ru, micropalaeontology@gmail.com

Рязанов К.П.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского» (ФГБУ «ВСЕГЕИ»), Санкт-Петербург, Россия

СТРУКТУРА ПУСТОТНОГО ПРОСТРАНСТВА В СИЛУРИЙСКИХ КАРБОНАТНЫХ ПОРОДАХ СЕВЕРО-ВОСТОКА ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ

Приведены результаты комплексного исследования структуры пустотного пространства низкоемких силурийских карбонатных коллекторов северо-восточных районов Тимано-Печорской провинции. Показана его морфология, описаны пористая среда, каналы и их взаимосвязь. Проведенные исследования свидетельствуют о сложном многокомпонентном характере пустотного пространства коллектора, обусловленном наличием разновидностей пустот: первичной матричной межкристаллической и межформенной пористости, вторичной микро-, макроавернозности и трещиноватости. Их типизация позволит дифференцированно подойти к оценке запасов нефти и газа и создать детальную геологическую основу для проектирования рациональной системы разработки.

Ключевые слова: *пустотное пространство коллектора, матричная пористость, микротрещина, силурийские карбонатные породы, Тимано-Печорская провинция.*

Введение

Наличие поровой структуры является основным контролирующим фактором проницаемости и упругих свойств пород. Тем не менее, породы, залегающие на одной глубине, с одинаковой пористостью, могут значительно отличаться по проницаемости и скорости прохождения упругих колебаний [Baechle et al., 2008]. В карбонатных породах поры имеют широкий диапазон размеров и часто формируют сложную взаимосвязанную сеть.

К настоящему времени влияние структуры пустотного пространства на петрофизические свойства карбонатных пород установлено многими исследователями [Fitch et al., 2015; Kumar, Nan, 2005; Lucia, 1999]. Большинство для классификации типов пор предлагается модель двойной пористости [Baechle et al., 2008; Jobe, Sarg, 2015]. Так, например, схема Р. Choquette и Л. Прау включает все основные типы карбонатных пор и состоит из двух генетических классификаций для первичной и вторичной систем пор

[Choquette, Pray, 1970]. Первичная пористость формирует межгранулярные (межформенные) поры осадка, сохранившиеся при литификации отложений. Тем не менее, большинство пор в карбонатных породах имеют вторичный характер [Choquette, Pray, 1970; Wilson, 2008].

Большой вклад в изучение пористости карбонатных пород внесли исследования F.J. Lucia [Lucia, 1983, 1999]. Классификация F.J. Lucia (1983 г.) также основана на двух классах: 1) межзерновой, межкристаллической (гранулярной) пористости и 2) полосной «пустотой» - пористости. Основой его классификации (1983 г.) является то, что распределение пор по размеру контролирует проницаемость и насыщенность породы, а сам характер такого распределения пор по размерам связан с «тканью» породы – ее текстурно-структурными особенностями. По этому признаку обобщенно выделяются три группы пород: 1) с преобладанием зерен (или граноморфных компонентов); 2) с равным количеством ила (микрозернистого компонента) и зерен; 3) с преобладанием ила. Классификация поровой системы упрощается путем установления следующих размерных классов пор: межгранулярные поры, отдельные (изолированные) каверны и пустоты, и контактирующие каверны/пустоты. Применяют также и другие более детальные классификации, например, основанные на размере пор [Lonoy, 2006].

Силурийские карбонатные породы северо-востока Тимано-Печорской провинции характеризуются неоднородным строением матричной пористости, представленной в основном дискретными участками развития вторичных пустот и сетью хаотичных микротрещин. В подобных коллекторах фильтрация углеводородов осуществляется преимущественно в системе трещин. Неоднородность и дискретность распределения параметров пор, каверн, трещин и каналов фильтрации обуславливают сложности моделирования карбонатных коллекторов.

В последние годы применяются новые методы исследований, позволяющие более точно определить взаимосвязь пор и каналов. При изучении коллекторов все чаще пользуются рентгеновской томографией, которая повышает точность оценки фильтрационно-емкостных свойств матрицы. Важным является также анализ эпигенетических преобразований пород, влияющих на формирование и переформирование пустотного пространства. Эти исследования, направленные на выявление неоднородности распределения пустотного пространства в матрице породы, могут быть полезны для детализации моделей миграции углеводородов в пластах.

Материал и методы исследований

Объектами исследований послужили сульфатно-карбонатные, карбонатные и глинисто-карбонатные породы, характеризующиеся низкими и невысокими значениями пористости и

проницаемости. Изучались образцы керна из 11 скважин площадей: Хоседаю-Неруюская, Усино-Кушшорская, Заостренская, Адакская, Воргамусюрская, Салюкинская, Среднемакарихинская, располагающиеся в центральной части гряды Чернышева и на юго-восточном борту Хорейверской впадины (рис. 1). В ходе исследования использовались результаты анализов, проведенных в центре коллективного пользования Института геологии Уральского отделения Российской академии наук «Геонаука» (ЦКП УрО РАН Геонаука, г. Сыктывкар), в Казанском (Приволжском) федеральном университете (г. Казань) и в Горном университете (г. Санкт-Петербург).

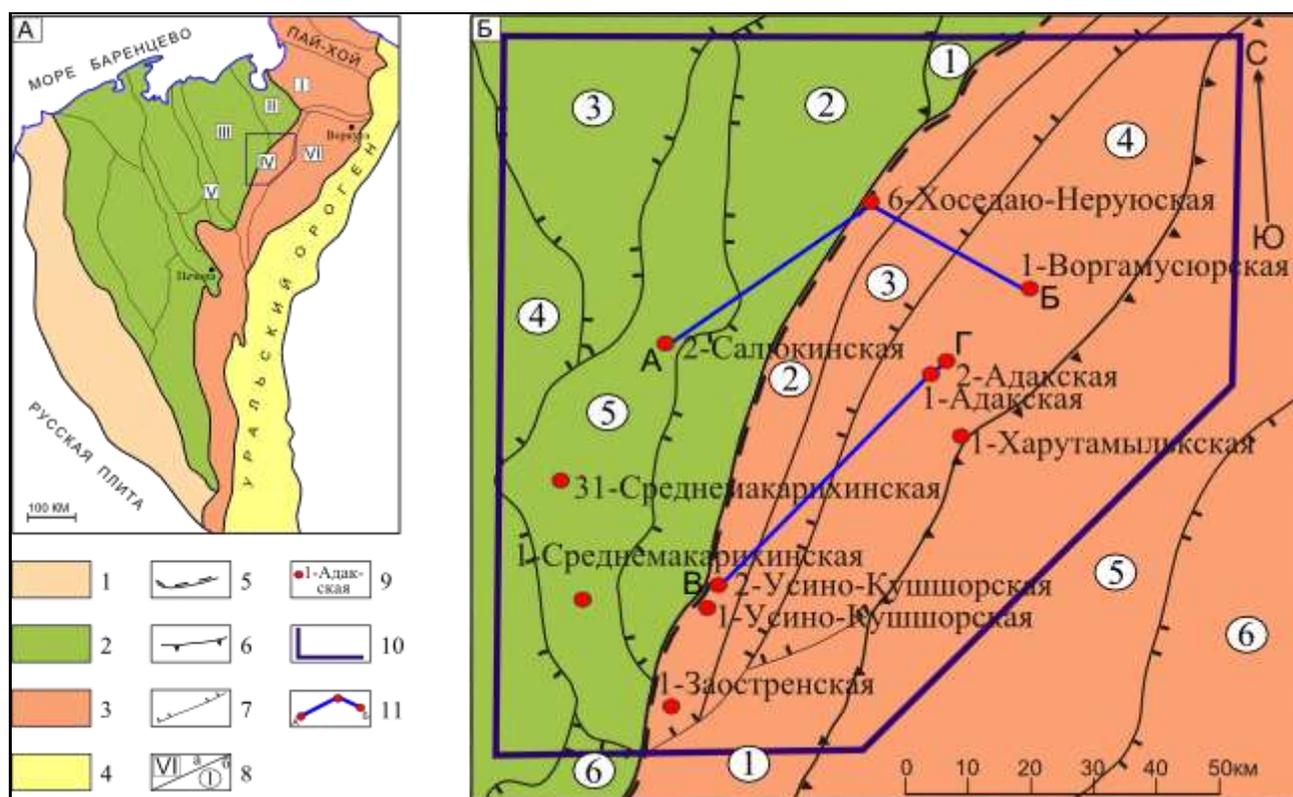


Рис. 1. Схема тектонического районирования территории исследований (по [Малышев, 2002])
 1 - Тиманская гряда; 2 - Печорская синеклиза; 3 - Предуральский краевой прогиб; 4 - Уральский кряж; 5-7 - границы структур: 5 - надпорядковых, 6 - первого порядка, 7 - второго порядка; 8 - номера структур: а - первого порядка, б - второго порядка; 9 - номера скважин; 10 - граница района исследований; 11 - корреляция разрезов. Структуры первого порядка: I - Кортаихинская впадина; II - Варандей-Адзвинская структурная зона; III - Хорейверская впадина; IV - гряда Чернышева; V - Колвинский мегавал; VI - Косью-Роговская впадина. Структуры второго порядка. Печорская синеклиза: Варандей-Адзвинская структурная зона: 1 - вал Сорокина. Хорейверская впадина: 2 - Цильгорская депрессия; 3 - Коллависовская ступень; 4 - Сандивейское поднятие; 5 - Макариха-Салюкинская антиклинальная зона; 6 - Сынянырдская котловина. Предуральский краевой прогиб: гряда Чернышева: 1 - Шарью-Заостренский блок; 2 - Хоседаюский вал; 3 - Адзвинская депрессия; 4 - Тальбейский блок. Косью-Роговская впадина: 5 - Кочмесская ступень; 6 - Абезьская депрессия.

Макро- и микроскопическое описание пород позволило уточнить и получить информацию о вещественном составе пород-коллекторов, степени их преобразованности и о

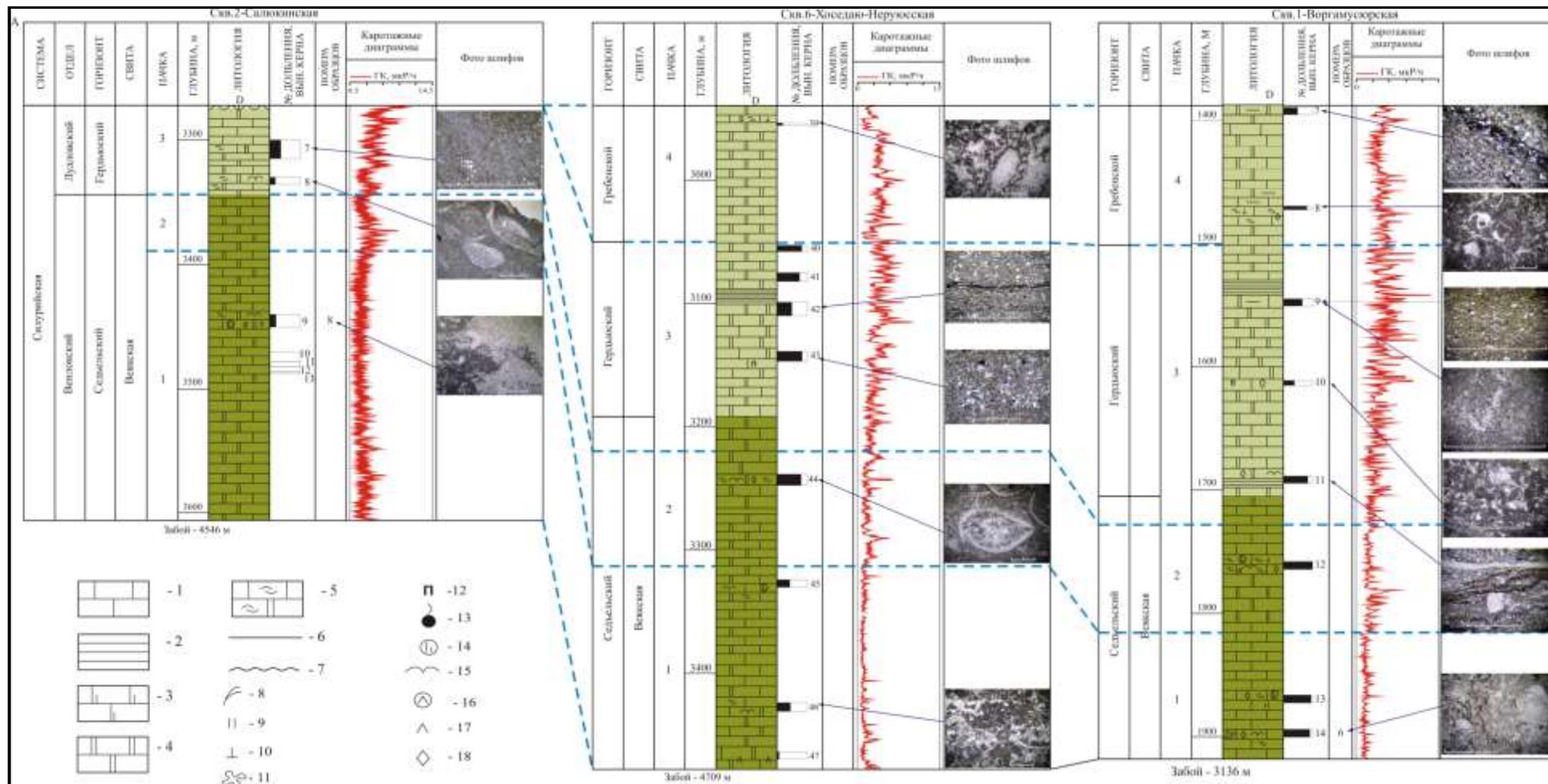
характере порового пространства. Изучены 180 петрографических шлифов.

Для исследования микроструктуры и морфологии пустотного пространства, а также для уточнения вещественно-минерального состава образцов пород, использованы методы электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии. Благодаря высокой разрешающей способности, удалось охарактеризовать структуру порового пространства (размер и форму пор, их соотношение с плотной породой) и оценить роль вторичного минералообразования в сохранении первичных и формировании вторичных пустот (путем диагностики кристаллографических форм и элементного состава новообразованных минералов).

Рентгенотомографические исследования проводились в Казанском (Приволжском) федеральном университете при помощи томографа (КТ) V |tome| XS 240 (GE Phoenix X-ray) и в Горном университете на микротомографе Skyscan 1173. Применение томографа позволило получить объемную растровую модель образца, оценить неоднородность пористости и морфологии порового пространства. С помощью метода возможно также определить общую пористость с высокой точностью, получить ее морфологию, размер и распределение в виде трехмерной модели.

Строение силурийского разреза

Рассмотренный керновый материал свидетельствует о значительном структурном и вещественном разнообразии пород, слагающих силурийский разрез исследуемой территории. Как показывают проведенные исследования, среди отложений преимущественно распространены доломиты, часто подверженные вторичным изменениям, и, в меньшей степени, известняки [Даньщикова, Майдль, 2019]. В подчиненном количестве отмечаются маломощные прослои аргиллитов, глинистых доломитов, доломит-ангидритовых пород. В породах проанализированы также присущие им структурно-текстурные особенности, обусловленные различными факторами литогенеза. Наиболее полный разрез силура вскрыт скважинами в центральной части Тальбейского блока гряды Чернышева. Западная часть гряды и восточный борт Хорейверской впадины характеризуется сокращенными мощностями, вследствие предтима́нского размыва. В наиболее полных разрезах выделены снизу-вверх четыре пачки, характеризующиеся определенным литологическим составом и записями радиоактивного каротажа (рис. 2). Пачкам 1 и 2 соответствует седельский горизонт, пачке 3 - гердьюский и подошва седельского горизонтов, пачке 4 - гребенской горизонт. Стратиграфическое расчленение силурийских отложений приводится в соответствии со стратиграфической схемой северо-восточного субрегиона Восточно-Европейской платформы [Постановление Межведомственного..., 2011, 2012].



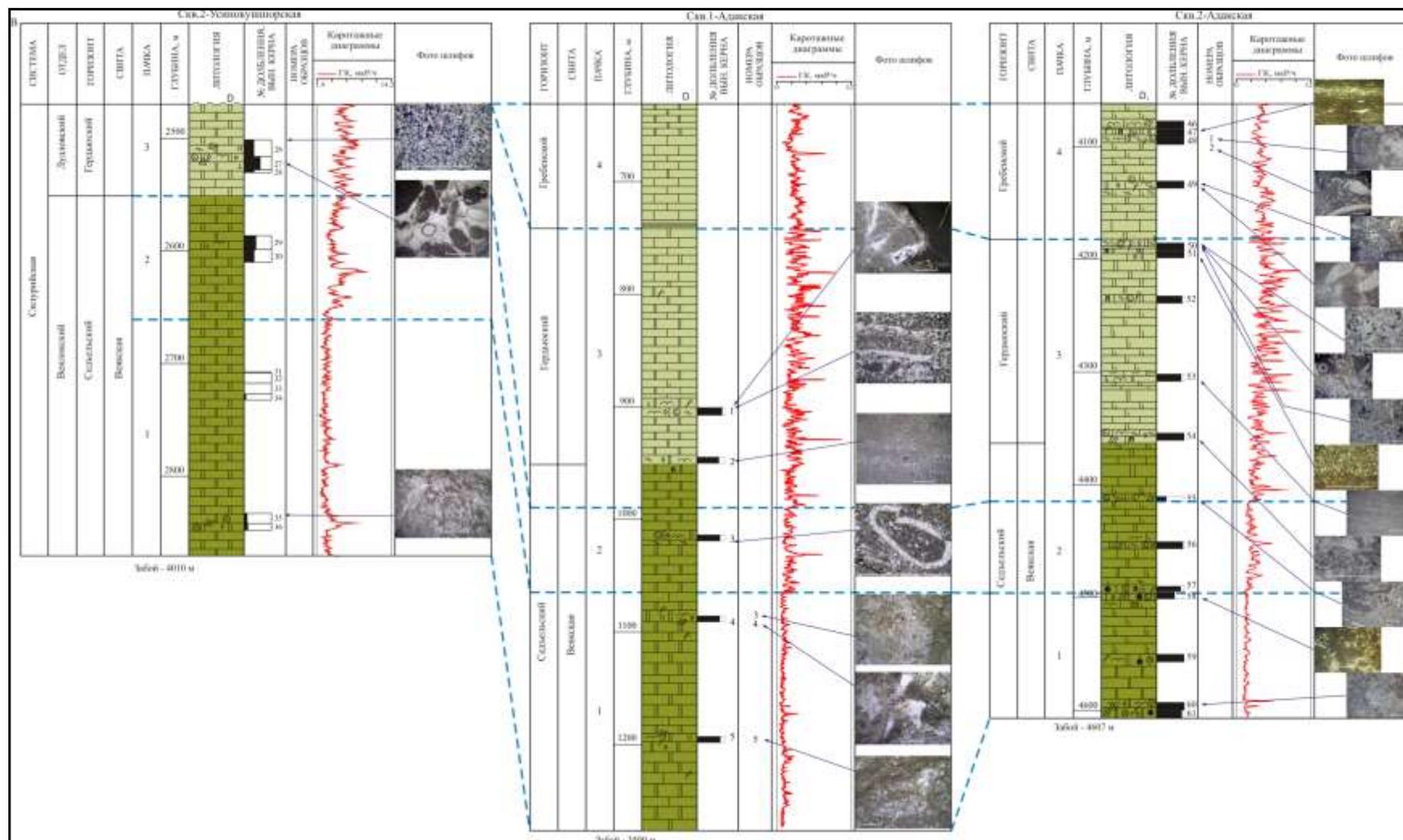


Рис. 2. Схема корреляции силурийских отложений по скважинам Тальбейского блока, Хоседаюского вала гряды Чернышева и Макариха-Салюкинской антиклинальной зоны Хорейверской впадины

Литология: 1 – известняк; 2 – глинистый прослой; 3 – известняк доломитизированный; 4 – доломит; 5 – известняки / доломиты органогенно-детритовые; стратиграфические границы: 6 – согласное залегание; 7 – несогласное залегание; вторичные процессы: 8 – трещиноватость; 9 – окремнение; 10 – кальцитизация; 11 – кавернозность; 12 – пиритизация; 13 – нефтепроявления; 14 – доломитизация; 15 – стилолитизация; 16 – сульфатизация; 17 – прослой сульфатов; 18 – перекристаллизация. А и В - см. пункт 11 на рис. 1.

Пачка 1. Нижняя часть пачки сложена коричневато-серыми, темно-серыми сильно преобразованными вторичными доломитами, которые представлены средне-крупнозернистыми зернами (размеры 0,05-0,4 мм) с конформными контактами. В породах сохраняются тени перекристаллизованного неопределимого детрита. В малозамещённых участках отмечаются остатки гастропод, брахиопод, остракод, криноидей, иглокожих, водорослей. Часть раковин позднее замещена ангидритом (в основном характерно для западной части гряды Чернышева). В доломитах иногда наблюдаются крупные участки новообразованного кальцита и окремнения. Доломиты слабо известковистые с открытыми и залеченными порами и с редкими мелкими кавернами выщелачивания (некоторые пустоты повторяют форму органических остатков). Их размеры колеблются от 0,1 до 0,5 см, часто соединяются между собой через сеть микротрещин. Стенки наиболее крупных пустот инкрустированы кальцитом или доломитом, в некоторых случаях отмечаются также примазки темно-коричневого битуминозного вещества.

Верхняя часть пачки представлена микробиальными известняками и доломитами с узорчатыми, полосчато-узорчатыми, полосчато-узловатыми текстурами (прослой до 15 см), которые переходят в верхней части в тонко горизонтально-волнисто-слоистую за счет послойного распределения глинистого вещества, сгустков и размерности зерен. Узорчатость часто усилена доломитизацией и, вероятно, является отражением водорослевой структуры породы. Контакты между доломитизированными и известковыми участками часто подчеркнуты стилолитовыми швами. Иногда в породе наблюдаются редкие каверны (до 3 см), залеченные новообразованным кальцитом либо кремнезёмом.

Мощность пачки 100-220 м.

Пачка 2. Нижняя ее часть сложена известняками серыми, темно-серыми, часто глинистыми, иногда с органогенно-детритовыми прослоями (~ 10 см) комковатыми текстурами, со следами интенсивной биотурбации. Органогенный материал представлен цельными фрагментами и обломками остракод, брахиопод, гастропод, иглокожих. Единично в биокластовом материале отмечаются остаточные пустоты угловатой формы. Наблюдается пирит в незначительных количествах в виде точечных зерен, реже в виде тонких корочек по биокластам. Нередко в породе отмечаются литокласты, представленные окатанными обломками (~ 1,5 см) пелитоморфных известняков. Порода сильно перекристаллизована по органическим остаткам, меньше – по основной массе, постепенно переходящая в доломиты скрыто-тонкозернистые.

Верхняя часть пачки 2 сложена преимущественно доломитами плитчатыми, микробиальными, серыми, с узорчатыми и сгустково-комковатыми текстурами. В них отмечаются фенестры, выполненные зернами чистого среднезернистого доломита. В

скважинах 1-Заостренская, 1-Среднемакарихинская в доломитах нередко отмечаются желваки ангидритов, замещающие органогенные остатки и выполняющие трещины и пустоты. Наряду с микробиальными доломитами в пачке наблюдаются маломощные прослои (около 10 см) известняков пелоидно-остракодовых с литокластами. Пелоиды и литокласты сложены пелитоморфным кальцитом.

Мощность пачки ~ 40-100 м.

Пачка 3. Подошвенная часть пачки представлена переслаиванием плитчатых доломитов волнисто-слоистых и узорчатых с тонкими прослойками глинистых аргиллитов. На контактах слоев часто отмечаются серии стилолитовых швов. На отдельных участках породы отмечается незначительная терригенная примесь. Несколько выше по разрезу преобладают доломиты тонко-волнисто-слоистые (водорослевого типа) со следами эрозии и трещин усыхания. Их сменяют прослои сильно глинистого доломита с карбонатными желваками. Выше наблюдаются тонкослоистые известняки пелоидно-биокластового и вторично-микрокомковатого полибиокластового составов (Хоседаюйский вал). Органогенные остатки представлены крупными и мелкими створками остракод, брахиопод, криноидей, гастропод. Завершают пачку узорчатые доломиты с микробиально-водорослевой структурой. Узорчатость подчеркивается выделениями пирита. Также часто встречаются горизонтальные ходы илоедов, обогащенные глинистым материалом. Мощность таких прослоев составляет 1,5 м. Выше по разрезу наблюдаются прослои (~ 0,5 м) известняка полибиокластового. Органогенный детрит (20%) формирует скопления несортированных цельных раковин и фрагментов остракод, трилобитов. Завершает пачку доломит мелкозернистый с единичными реликтами перекристаллизованных органогенных остатков (вероятно остракод).

Мощность пачки увеличивается в восточном направлении и варьирует от ~ 70 до 220 м.

Пачка 4. В подошве пачки выделяется прослой 2-3 см известняка табулятового, в доломитизированном глинистом матриксе, выше которого залегают известняки микробиальные сгустково-комковатые с сильно корродированным детритом и известняки биокластовые (~ 2 м). Биокласты (20%) - несортированные фрагменты остракод (преобладают), мшанок, иглокожих, трилобитов. Выше (прослой 1,5-2 м) представлены известняки полибиокластовые с крупными обломками колоний строматопорат и табулят, раковинами гастропод и толстостенных брахиопод. Текстура породы крупнокомковатая. Основу породы слагают несортированные относительно целые скелетные фрагменты и обломки остракод, трилобитов, мшанок, иглокожих [Даньщикова, Майдль, 2017].

В верхней половине пачки биокластовые известняки резко сменяются переслаиванием доломитов и известняков мелкозернистых, с небольшим количеством детрита (мощность

прослоев 1-3 см). Для пород характерна пятнисто-комковатая текстура, отдельные прослои имеют эрозионный характер границ. Кровельную часть слагают карбонатные аргиллиты, обогащенные терригенной примесью, мелким пиритизированным, сильно перекристаллизованным детритом и мелкими обломками карбонатных пород. С резким эрозионным контактом на аргиллитах залегает кораллово-строматопоровый биостром дендровидной формы, мощностью 5 см, выше которого отмечаются органогенные конгломерато-брекчии. Брекчия состоит из обломков строматопорат и табулят. Выше по разрезу наблюдается переслаивание известняков биокластовых со структурой песчаников и известняков микробиальных сгустковых и микрокомковатых с единичными органогенными остатками. Известняки образуют прослои невыдержанной мощности линзовидной и комковатой формы, с глинистыми (аргиллитизированными) прослойками. Далее в разрезе начинают преобладать микробиальные известняки. Детрит и обломки обогащают лишь тонкие прослои [Даньщикова, Майдль, 2017].

Мощность пачки ~ 100-120 м.

Пустотное пространство в силурийских карбонатных породах

В изученном керновом материале при визуальном наблюдении и при микроскопических исследованиях отмечается большое разнообразие пустот, отличающихся как по морфологическим признакам и генезису, так и по особенностям распределения их в матрице породы. Образование емкостного пространства в карбонатных породах происходило на всех стадиях литогенеза, формируя в зависимости от генезиса и времени образования первичную и вторичную пустотность. Согласно классификации Л.П. Гмид, к **первичной пористости** относят межгранулярные и межформенные поры, сохранившиеся в породе со стадии седиментогенеза и раннего диагенеза [Гмид, 1968]. **Вторичные (эпигенетические) поры** объединяют межгранулярные поры, возникшие в результате перекристаллизации или растворения, поры растворения и остаточные поры, оставшиеся незаполненными при эпигенетическом минералообразовании.

Первичная пористость чаще встречается в карбонатных породах верхнего силура и сохраняется в существенно иловых (микритовых) известняках и доломитах. Поры имеют обычно округло-угловатую форму и размер не превышающий 0,1-0,15 мм (рис. 3а).

Вторичная пористость. Среди вторичных пустот в карбонатных породах отмечаются межзерновые поры эпигенетической перекристаллизации и доломитизации, поры и каверны выщелачивания, стилолиты и трещины. Вторичная пористость чаще всего отмечается во вторичных доломитах (рис. 3б).

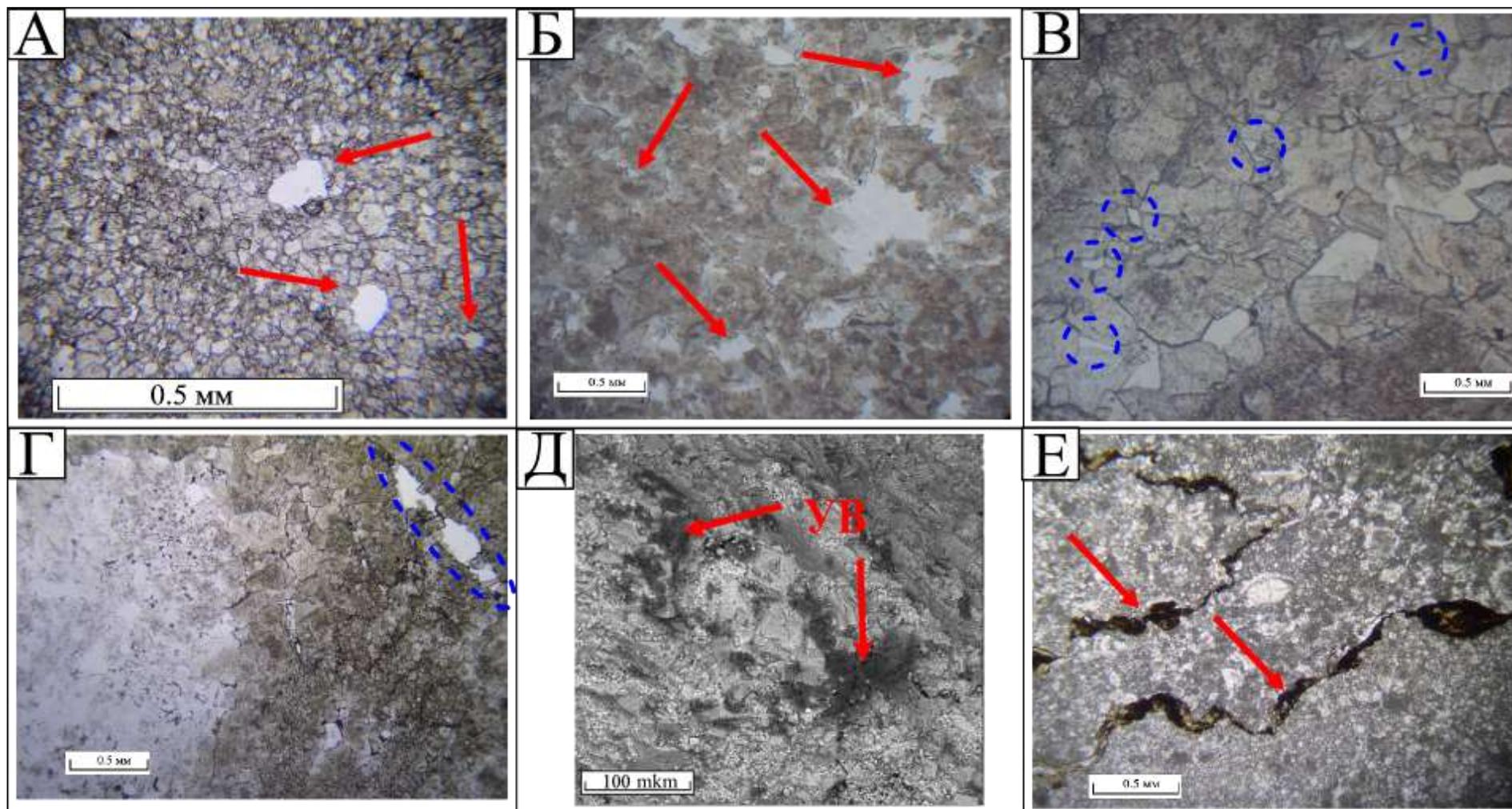


Рис. 3. Фото структурно-морфологических особенностей карбонатных пород

а – первичные пустоты в мелко-среднезернистом доломите (указаны стрелками); б – крупные поры и каверны выщелачивания во вторичном доломите (указаны стрелками); в – межзерновые поры угловатой формы между зернами доломита (выделены синими кружками); г – линейно вытянутые пустоты расширения внутри трещин во вторичных доломитах (выделен синим кружком); д – извилистые микротрещины, насыщенные битуминозным веществом, в доломитизированном известняке (указаны стрелками); е – бугорчатые стилитовые шивы в органогенно-детритовом известняке, выполненные глинисто-битуминозным материалом (указаны стрелками).

Межзерновые поры формируются при перекристаллизации основной матрицы породы. Промежутки образуются при нарастании навстречу друг другу зернами доломита (рис. 3в). Форма таких пор неправильная, угловатая. Распределение их неравномерное, пятнистое и рассеянное. По морфологии выделяются средние и крупные поры от 0,2 до 1 мм. Под электронным микроскопом отмечаются очень мелкие и микропоры – 0,02-0,005 мм. Нередко в них по стенкам граней зерен доломита отмечается битумонасыщение. Сообщаемость вторичных пустот между собой хорошая только в грубо-крупнозернистых доломитовых участках (см. рис. 3б). В мелко-среднезернистых доломитовых участках они имеют плохую связность, либо вообще изолированы друг от друга.

Кавернообразные поры представлены пустотами растворения. Форма их неправильная, удлинённая, округло-изометричная, щелевидная. Размеры не превышают 2 мм. Нередко они представляют собой пустоты расширения - линейно вытянутые в цепочки внутри трещин и стилолитов (рис. 3г). Сообщаются между собой через сеть микротрещин. Распределение пустот выщелачивания неравномерное, рассеянное.

Каверны образуются благодаря процессам доломитизации, которые сопровождаются выносом растворенных компонентов. В породе они располагаются беспорядочно. В шлифах и породе встречаются, в основном, мелкие каверны (2-10 мм). Форма их неправильная с зигзаго-, заливообразными и округлыми контурами (см. рис. 3б). Каверны часто изолированы друг от друга. Нередко на стенках нарастают зерна доломита, иногда кварца. Каверны чаще всего заполнены вторичными минералами (ангидритом, доломитом, реже кальцитом, кремнезёмом, гипсом), реже открыты.

Трещины по происхождению подразделяются на литогенетические (диагенетические, эпигенетические) и тектонические.

Диагенетические и эпигенетические микротрещины извилистые, ветвящиеся, часто прерывистые с незначительной протяженностью. При микро- и макроописании иногда отмечается полное, либо реже, частичное заполнение их минеральным веществом (кальцитом, доломитом, ангидритом), либо примазки битуминозного вещества (рис. 3е).

Тектонические трещины имеют значительную протяженность, ширина варьирует от 0,7-0,01 мм, редко достигает 0,2 мм. В основном они секут зерна и форменные образования, либо пересекают стилолитовые швы или диагенетические и эпигенетические трещины. Нередко в трещинах есть пустоты расширения (рис. 3г). Отмечаются зеркала скольжения, чаще всего в образцах из скважин Адакской площади.

Особую группу трещин растворения под давлением составляют *стилолиты* [Киркинская, Смехов, 1981]. Выделяются стилолиты как зачаточных бугорчатых, зубчатых типов, так и хорошо выраженных стилолитовых швов с амплитудой до 1 мм, расположенных

обычно субпараллельно слоистости. По ним часто отмечаются открытые микротрещины более поздней генерации со вторичными пустотами выщелачивания. Нередко в породе вблизи стилолитов наблюдаются новообразования крупных зерен доломита, ангидрита и примазки коричневого или почти черного битума (рис. 3д). Стилолитизацию следует рассматривать как длительный процесс, который проходит как при диагенезе, так и при катагенезе. Об этом свидетельствуют новообразования доломита, аутигенных минералов (барит, целестин), битуминозного вещества вдоль стилолитов [Даньшикова, Майдль, Митюшева, 2019].

Структура порового пространства

Размеры пор и поровых каналов, их распределение по величинам и в поровом объеме, сообщаемость между собой являются важнейшими показателями для построения гидродинамических моделей фильтрации в разнородной поровой среде [Азиз, Сеттари, 1982]. Изучение особенностей структуры порового пространства проводилось на образцах некоторых литотипов карбонатных пород, распространенных в силурийских толщах региона (табл. 1).

Разнозернистые доломиты с теневой биогермной (строматопорово-водорослевой) структурой (рис. 4). Основная масса породы сложена зернами среднезернистого доломита. По пустотам развиваются более крупнозернистые зерна доломита гипидиоморфной и идиоморфной формы. В ряде случаев выщелачивание в доломитах сопровождалось окремнением. Об этом свидетельствуют рассеянные в породе крупные (до 1 мм), удлиненные поры и мелкие каверны (до 1 см), стенки которых инкрустированы кремнеземом. Окремнение на отдельных участках развито по строматопоровым участкам. Порода неравномерно пористая с кавернами и трещинами. Основной объем пустот составляют каверны выщелачивания, по которым развито вторичное минералообразование, которое привело к усложнению форм пустотного пространства и иногда к их запечатыванию. Пустотное пространство представлено порами межкристаллическими и пустотами выщелачивания различной формы и генезиса. Межкристаллическая пористость приурочена гипидиоморфным и идиоморфным зернам доломита. Форма пор вытянутая, сложная. Менее развиты внутризерновые угловатые микропоры, изолированные процессами перекристаллизации и роста зерен. В породе преобладают поры размером от 13 до 114 мкм. Характеризуются они высокими величинами среднего объема пор (до 780000 мкм³) и условным средним диаметром пор более 100 мкм при низкой плотности пор 22 шт/мм³.

Таблица 1

Параметры пористости по результатам томографических съемок

Порода	Скважина	Возраст	Глубина	Открытая пористость, %	Средний объем пор (мкм ³)	Средний диаметр пор (мкм)	Объемная пористость (шт./мм ³)
Известняк илово-биокластовый	2-Адакская	S _{2gr}	4095	6,8	13371	29	5070
			4097	3,2	3268	18	12263
Разнозернистый доломит с теневой биогермной (строматопорово-водорослевой) структурой	1-Адакская	S _{1sd}	1086,6	0,1	1274	13	792
		S _{1sd}	1088,7	1,7	781947	114	22
		S _{1sd}	1196,2	0,6	11371	28	500
Известняк граноморфный пелоидно-остракодовый	1-Воргамусюрская	S ₁	1897	0,01	1536	14	52
Доломит иловый	1-Усино-Кушшорская	S ₁	2338	0,03	1167	13	248
Известняк доломитизированный органогенно-детритовый	2-Салюкинская	S _{1sd}	3450	0,08	5340	22	149
Известняк доломитизированный органогенно-детритовый	1-Средне-макарихинская	S ₁	3083	0	-	-	-
Разнозернистый доломит с биогермной структурой		S ₁	3098,5	0,5	35607	41	148

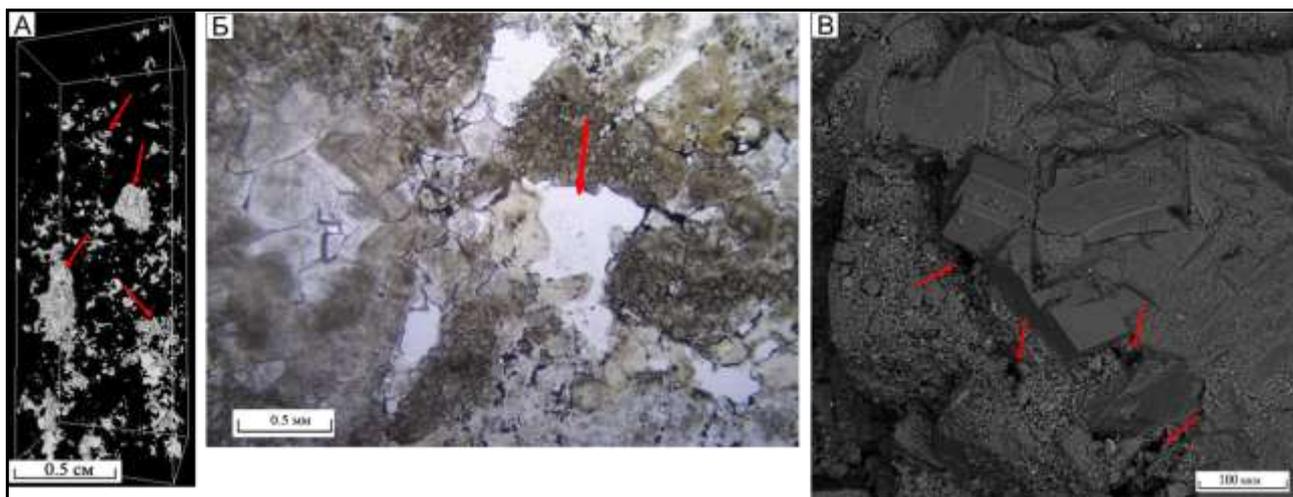


Рис. 4. Фото разномасштабного доломита с теневой биогермной (строматопорово-водорослевой) структурой

Скв. 1-Адакская, глубина 1088,7 м, седельский горизонт (S_{1sd}).

а – распределение пустотного пространства на трехмерной модели (показаны стрелками); б – кавернозно-расширенные поры выщелачивания, стенки инкрустированы кремнеземом (указан стрелкой); в – кристаллы доломита с вогнутыми гранями (седловидный доломит) (указан стрелкой).

Отмечаются прерывистые микротрещины и стилолиты с пустотами выщелачивания. Часто трещины соединяют каверны и мелкие пустоты между собой. Раскрытость их достигает 20-200 мкм. Формирование и переформирование пустот растворения связано с подземным кислотным выщелачиванием, в результате подкисления подземных вод газами, генерированными при термальной сульфатредукции. Основными подтверждающими это признаками являются разрушение породы, заполнение карстовых полостей карбонатной мукой, присутствие седловидных кристаллов доломита и зерен барита [Юдович, 1981]. Пористость в таких разновидностях достигает 0,1-1,7%.

Известняки доломитистые органогенно-детритовые со значительной долей микритового компонента (рис. 5). Основная масса – плотная матрица, представленная тонко-колоиднозернистыми зернами кальцита, среди которых перекристаллизованные остатки иглокожих, остракод и доломитизированные участки. Наблюдается заполнение пустот крупными (до 1,5 мм) кристаллами вторичного кальцита. Пустоты плохо взаимосвязаны друг с другом. Микропоры в слагающем основу породы микрите значительно «заблокированы» процессами перекристаллизации и доломитизации, сопровождающихся увеличением размеров зерен. Первичные межзерновые поры, которые сохраняются внутри этих зерен, приобретают характер внутризерновых изолированных. Основной объем пор связан с доломитизированными участками. Доломит представлен гипидиоморфными и ромбоэдрической формы кристаллами. Большинство пор имеют сложное причудливое очертание. Размер пор варьирует от < 0,2 до 45 мкм, средний размер пор 22 мкм. В породе наблюдается сеть коротких хаотичных микротрещин шириной до 90 мкм, соединяющих

локальные (выщелоченные) пористые участки породы с мелкими порами выщелачивания хорошей связанности. Часть трещин и микропор нефтенасыщена. Открытая пористость составляет 0,08%.

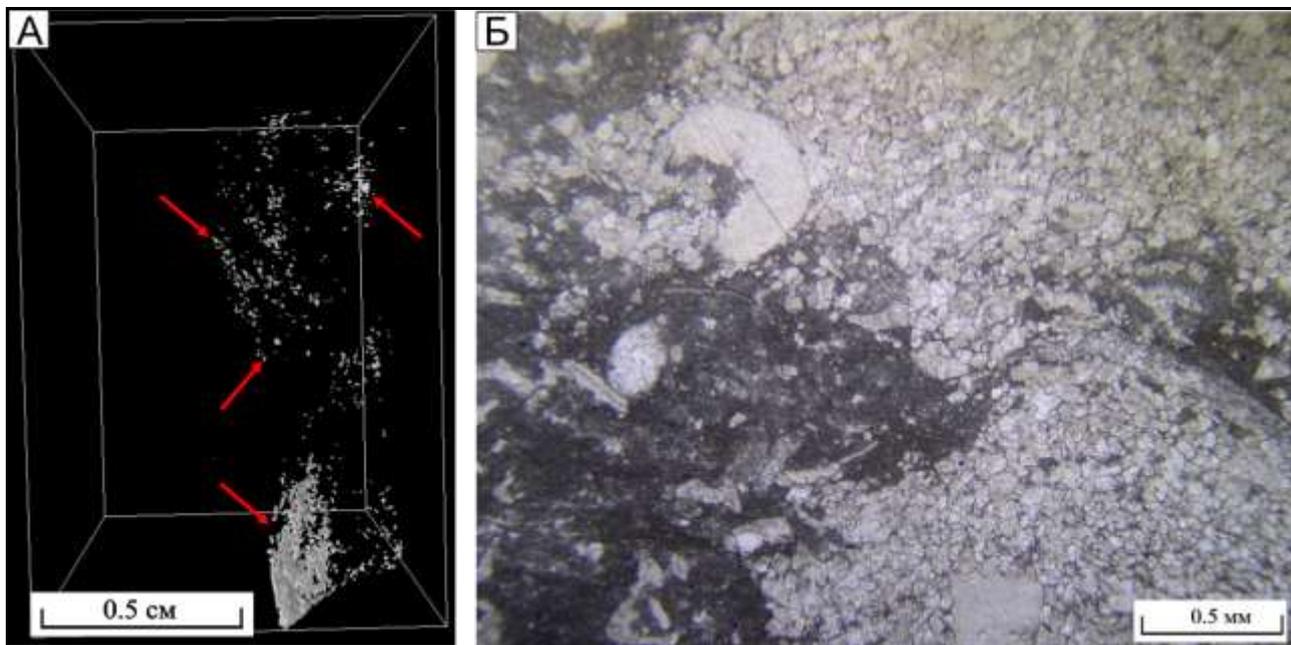


Рис. 5. Фото доломитизированного органогенно-детритового известняка

Скв. 2-Салюкинская, глубина 3450 м, седельский горизонт (S_{1sd}).

а – распределение пустотного пространства на трехмерной модели (указаны стрелками); б – фото шлифа.

Известняки граноморфные пелоидно-остракодовые с мелко-среднезернистым доломитовым и ангидритовым цементом (рис. 6). В результате неоднородной перекристаллизации порода имеет плотную структуру матрицы. Редкие рассеянные в породе поры относятся к межкристаллическим пустотам выщелачивания и расширения трещин, не связанные друг с другом. Сложность и морфологии пустотного пространства обусловлена вторичным минералообразованием. Средний размер пор - 14 мкм. В основном поры приурочены к органическим остаткам. Значение общей пористости по данным томографии не превысило 0,01%, средний объем пор составил 1536 мкм³ при плотности – 52 шт./мм³.

Доломиты иловые характеризуются мелкими порами менее 20 мкм и плотной матрицей (рис. 7). Так, например, в мелкозернистом доломите с послойным обогащением терригенным материалом отмечены лишь редкие рассеянные межзерновые поры, размерами от 3 до 50 мкм. Распределены они цепочками, вероятно вдоль микротрещин. Трещины короткие, извилистые с зиянием 1-2 мкм. По трещинкам и порам отмечается насыщение органическим веществом. По данным РЭМ отмечается рассеянная вкрапленность сульфатов кальция (гипса и ангидрита) и сульфидов железа. По данным томографии пористость образца

этого доломита составляет 0,03%, средний объем пор - 1167 мкм; средний диаметр пор - 13 мкм, плотность пор - 248 шт./мм³.

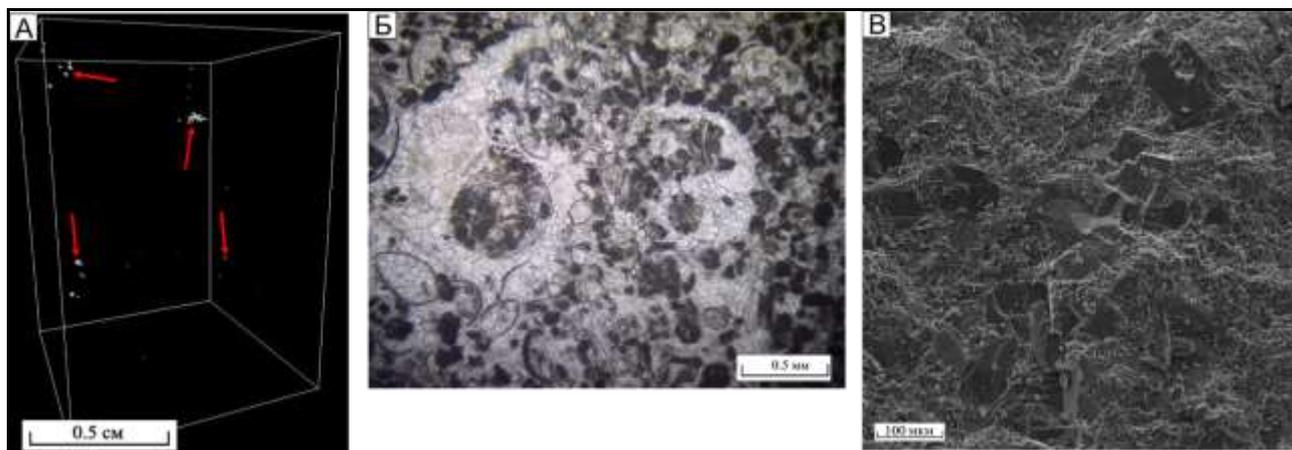


Рис. 6. Фото граноморфного пелоидно-остракодового известняка

Скв. 1-Воргамустюрская, глубина 1897 м, нижний силур (S_1).

а – распределение пустотного пространства на трехмерной модели (указаны стрелками); б – фото шлифа; в – плотная структура матрицы породы.

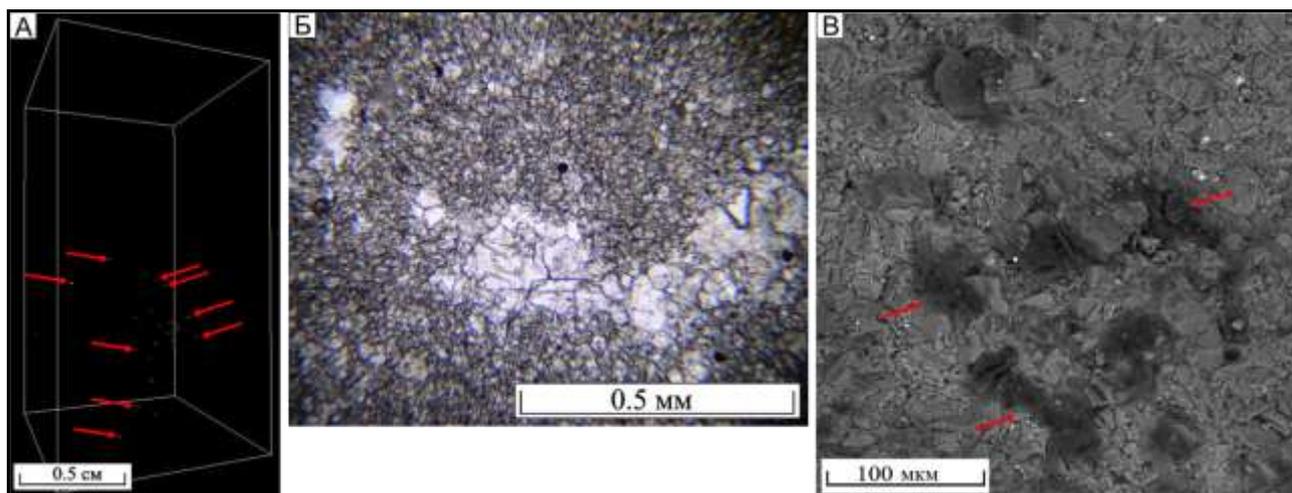


Рис. 7. Фото илового доломита

Скв. 1-Усино-Кушшорская, глубина 2338 м, седельский горизонт (S_{1sd}).

а – распределение пустотного пространства на трехмерной модели (указаны стрелками); б – фото шлифа; в – насыщение битуминозным веществом по трещинам и порам (указаны стрелками).

Для илово-биокластовых известняков верхнего силура со структурой пакстоуна и преобладающим размером зерен матрикса 20-100 мкм характерны неравномерные скопления мелких пор (рис. 8). Преобладают межзерновые пустоты, наследующие первичные внутренние скелетные поры и возникшие в результате грануляции/микритизации остатков табулят, а также поры перекристаллизации микрозернистого материала матрикса. Плотные скопления пор образуют своеобразную ячеистую сеть. Диаметр пор колеблется от < 20 до > 500 мкм, условный средний их диаметр - 18 -29 мкм, а плотность пор достигает 5070-

12263 шт./мм³. (см. табл. 1). Местами участки скоплений соединены секущими трещинами с зиянием 30-50 мкм. Пористость образцов колеблется от 3,2 до 6,8%.

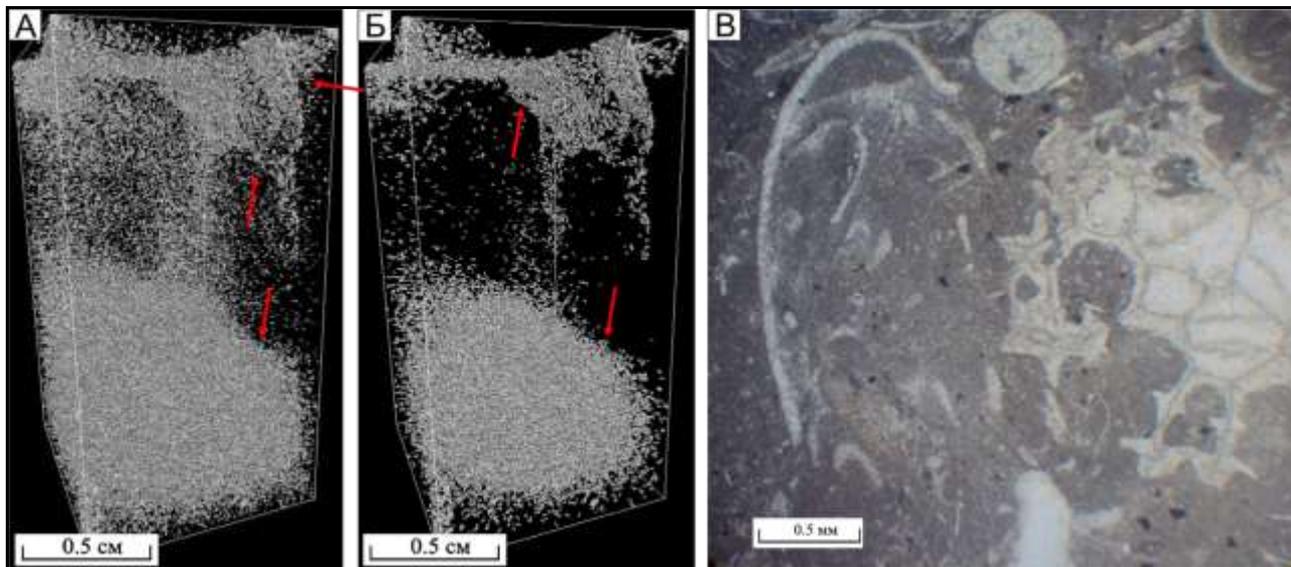


Рис. 8. Фото илово-биокластового известняка

Скв. 2-Адакская, глубина 4095 м, гребенской горизонт (S_{2gr}).

а – распределение всех пор в породе (указаны стрелками), б – поры более 100 мкм (указаны стрелками), в – шлиф породы.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют о сложном многокомпонентном характере пустотного пространства коллектора, обусловленном наличием разновидностей пустот: первичной матричной межкристаллической пористости, вторичной микро- и макрокавернозности и трещиноватости. Различные сочетания этих видов пустот формируют сложную взаимосвязанную сеть между собой и определяют количественные показатели емкостных и фильтрационных свойств пород. Очевидно, что представления о присутствии в едином резервуаре нескольких типов коллекторов связаны с определенной схематизацией характера изменения структуры пустотного пространства породы и ее коллекторских свойств. В реальных условиях изменения, обусловленные диагенетическими и эпигенетическими процессами, более сложны. Как показывают исследования, качество пород-коллекторов зависит не только от первичного внутреннего скелета, но и от эпигенетических процессов, которые приводят к усложнению форм либо к запечатыванию пустот в карбонатных породах. Наиболее благоприятными из вторичных изменений для улучшения фильтрационно-емкостных свойств являются выщелачивание и доломитизация совместно с перекристаллизацией. Однако типизация, учитывающая принципиальные отличия реально существующих разностей продуктивного коллектора, облегчает качественное и количественное сопоставления различных частей залежи, позволяет

дифференцированно подходить к оценке запасов нефти и газа и создать детальную геологическую основу для проектирования рациональной системы разработки.

Литература

Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. Пер. с англ. – М.: Недра, 1982. – 407 с.

Гмид Л.П. Литолого-петрографические исследования карбонатных коллекторов нефти и газа // Труды ВНИГРИ. – Вып. 264. – 1968. – С.44-62.

Даньщикова И.И., Майдль Т.В. Литолого-фациальная характеристика гребенского горизонта Тальбейского блока (гряда Чернышева) // Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2017. – С.67-69.

Даньщикова И.И., Майдль Т.В. Условия формирования пород-коллекторов силурийских отложений центральной части гряды Чернышева // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2019. – Т.14. – №2. – http://www.ngtp.ru/rub/2019/20_2019.html. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/20_2019

Даньщикова И.И., Майдль Т.В., Митюшева Т.П. Эпигенетические изменения карбонатных пород и их связь с химическим составом воды в верхнеордовикско-нижнедевонском нефтегазоносном комплексе гряды Чернышева и восточного борта Хорейверской впадины // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2019. – Т.14. – №4. – http://www.ngtp.ru/rub/2019/44_2019.html. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/44_2019

Киркинская В.Н., Смехов Е.М. Карбонатные породы - коллекторы нефти и газа. - Л.: Недра, 1981. - 255 с.

Малышев Н.А. Тектоника, эволюция и нефтегазоносность осадочных бассейнов европейского севера России. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 271 с.

Постановление Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. – СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. – Вып. 41. – 48 с. (МПР, Роснедра, ВСЕГЕИ, РАН, МСК России).

Постановление Межведомственного стратиграфического комитета России и его постоянных комиссий. – СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2011. – Вып. 40. – 48 с. (МПР, Роснедра, ВСЕГЕИ, РАН, МСК России).

Юдович Я.Э. Региональная геохимия осадочных толщ. - Л.: Наука, 1981. - 276 с.

Baechle G.T., Colpaert A., Eberli G.P., Weger R.J. Effects of microporosity on sonic velocity in carbonate rocks // The Leading Edge. - 2008. - V. 27. - N. 8. - P. 1012-1018.

DOI: <https://doi.org/10.1190/1.2967554>

Choquette P., Pray L. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates // AAPG Bulletin. - 1970. - V. 54. - Issue 22. - P. 207-250.

Fitch P.J., Lovell M.A., Davies S.J., Pritchard T., Harvey P.K. An intergrated and quantitative approach to petrophysical heterogeneity // Marine and Petroleum Geology. - 2015. - Vol. 63. - P. 82-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.02.014>

Jobe T., Sarg J. Microporosity characterization of mud-rich carbonate rocks // Pore Scale Phenomena: Frontiers in Energy and Environment. - World Scientific Series in Nanoscience and Nanotechnology, 2015. - P. 67-89. DOI: https://doi.org/10.1142/9789814623063_0005

Kumar M., Han D.-H. Pore shape effect on elastic properties of carbonate rocks // SEG Annual Meeting (6-11 November 2005, Houston, Texas): Society of Exploration Geophysicists. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1306/03130605104>

Lonoy A. Making sense of carbonate pore systems // AAPG Bulletin. - 2006. - V. 90. - N. 9. - P. 1381-1405.

Lucia F.J. Carbonate reservoir characterization: Berlin, Springer-Verlag, 1999. - 226 p.

Lucia F.J. Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks // A field classification of carbonate pore space // Journal of Petroleum Technology. - 1983. - P. 626-637. DOI: <https://doi.org/10.2118/10073-PA>

Wilson M.E. Global and regional influences on equatorial shallowmarine carbonates during the Cenozoic // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. - 2008. - V. 265. - Issue 3-4. - P. 262-274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.05.012>

Dan'shchikova I.I., Maydl' T.V., Zhuravlev A.V.

Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IG FRC Komi SC UB RAS), Syktyvkar, Russia, iidanshikova@geo.komisc.ru, maydl@geo.komisc.ru, micropalaeontology@gmail.com

Ryazanov K.P.

Russian Geological Research Institute (VSEGEI), St. Petersburg, Russia

VOID SPACE STRUCTURES INSIDE SILURIAN CARBONATE ROCKS OF NORTHEAST TIMAN-PECHORA PETROLEUM PROVINCE

This work presents the results of a comprehensive study of the structure of the void space of low-capacity Silurian carbonate reservoirs in the northeastern regions of Timan-Pechora petroleum province. The morphology of void spaces is shown, the porous medium and channels are described and their relationship with each other. The conducted research shows the complex multicomponent nature of the reservoir void spaces due to the presence of various types of voids: primary matrix intercrystalline and interform porosity, secondary micro- and macrocavernosity and fracture providing void spaces. Their typification will allow a differentiated approach to the assessment of oil and gas reserves and create a detailed geological basis for the design of a rational development system.

Keywords: reservoir void space, matrix porosity, microfracture, Silurian carbonate rock, Timan-Pechora petroleum province.

References

Aziz Kh., Settari E. *Matematicheskoe modelirovanie plastovykh sistem* [Petroleum reservoir simulation]. Moscow: Nedra, 1982, 407 p.

Baechle G.T., Colpaert A., Eberli G.P., Weger R.J. Effects of microporosity on sonic velocity in carbonate rocks. *The Leading Edge*, 2008, vol. 27, no. 8, pp. 1012-1018. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.2967554>

Choquette P., Pray L. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG Bulletin*, 1970, vol. 54, issue 22, pp. 207-250.

Dan'shchikova I.I., Maydl' T.V. *Litologo-fatsial'naya kharakteristika grebenskogo gorizonta Tal'beyskogo bloka (gryada Chernysheva)* [Lithologic-facial characteristics of the Greben level of the Talbey block (Chernyshev ridge)]. *Geodinamika, veshchestvo, rudogenez Vostochno-Evropeyskoy platformy i ee skladchatogo obramleniya: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Syktyvkar: IG Komi NTs UrO RAN, 2017, pp.67-69.

Danshikova I.I., Maydl T.V. *Usloviya formirovaniya porod-kollektorov siluriyskikh otlozheniy tsentral'noy chasti gryady Chernysheva* [Formation genesis of Silurian reservoirs belonging to the central part of the Chernyshev Ridge]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 2019, vol. 14, no. 2, available at: http://www.ngtp.ru/rub/2019/20_2019.html. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/20_2019

Danshikova I.I., Maydl T.V., Mityusheva T.P. *Epigeneticheskie izmeneniya karbonatnykh porod i ikh svyaz' s khimicheskim sostavom vody v verkhneordoviksko-nizhnedevonskom neftegazonosnom komplekse gryady Chernysheva i vostochnogo borta Khoreyverskoy vpadiny* [Carbonate rocks epigenetic changes and their connection with chemical composition water of Upper Ordovician-Lower Devonian petroleum bearing area of the Chernyshev Ridge and eastern side of the Khoreyver Depression]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 2019, vol. 14, no. 4, available at: http://www.ngtp.ru/rub/2019/44_2019.html. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/44_2019

Fitch P.J., Lovell M.A., Davies S.J., Pritchard T., Harvey P.K. An integrated and quantitative approach to petrophysical heterogeneity. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, vol. 63, pp. 82-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.02.014>

Gmid L.P. *Litologo-petrograficheskie issledovaniya karbonatnykh kollektorov nefiti i gaza*

[Lithologic and petrographic studies of carbonate oil and gas reservoirs]. Trudy VNIGRI, issue 264, 1968, pp. 44-62.

Jobe T., Sarg J. Microporosity characterization of mud-rich carbonate rocks. Pore Scale Phenomena: Frontiers in Energy and Environment. World Scientific Series in Nanoscience and Nanotechnology, 2015, pp. 67-89. DOI: https://doi.org/10.1142/9789814623063_0005

Kirkinskaya V.N., Smekhov E.M. *Karbonatnye porody - kollektory nefti i gaza* [Carbonate rocks - oil and gasreservoirs]. Leningrad: Nedra, 1981, 255 p.

Kumar M., Han D.-H. Pore shape effect on elastic properties of carbonate rocks. SEG Annual Meeting (6-11 November 2005, Houston, Texas): Society of Exploration Geophysicists. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1306/03130605104>

Lonoy A. Making sense of carbonate pore systems. AAPG Bulletin, 2006, vol. 90, no. 9, pp. 1381-1405.

Lucia F.J. Carbonate reservoir characterization: Berlin, Springer-Verlag, 1999, 226 p.

Lucia F.J. Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks. A field classification of carbonate pore space. Journal of Petroleum Technology, 1983, pp. 626-637. DOI: <https://doi.org/10.2118/10073-PA>

Malyshev N.A. *Tektonika, evolyutsiya i neftegazonosnost' osadochnykh basseynov evropeyskogo severa Rossii* [Tectonics, Evolution and Oil and Gas Bearing of Sedimentary Basins of the European North of Russia]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2002, 271 p.

Postanovleniya Mezhhvedomstvennogo stratigraficheskogo komiteta i ego postoyannykh komissiy [Resolutions of the Interdepartmental Stratigraphic Committee and its standing committees]. St. Petersburg: Izd-vo VSEGEI, 2012, issue 41, 48 p. (MPR, Rosnedra, VSEGEI, RAN, MSK Rossii).

Postanovleniya Mezhhvedomstvennogo stratigraficheskogo komiteta Rossii i ego postoyannykh komissiy [Resolutions of the Interdepartmental Stratigraphic Committee and its standing committees]. St. Petersburg: Izd-vo VSEGEI, 2011, issue 40, 48 p. (MPR, Rosnedra, VSEGEI, RAN, MSK Rossii).

Wilson M.E. Global and regional influences on equatorial shallowmarine carbonates during the Cenozoic. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, vol. 265, issue 3-4, pp. 262-274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.05.012>

Yudovich Ya.E. *Regional'naya geokhimiya osadochnykh tolshch* [Regional geochemistry of sedimentary formations]. Leningrad: Nauka, 1981, 276 p.

© Даньщикова И.И., Майдль Т.В., Журавлев А.В., Рязанов К.П., 2020

