

УДК 553.98:551.83:551.734.5

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАННЕФАМЕНСКИХ РИФОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ДЕНИСОВСКОГО ПРОГИБА ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Кривошеков Сергей Николаевич¹,
krivoshchekov@gmail.com

Боталов Андрей Николаевич¹,
botalov97@yandex.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

Актуальность. В настоящее время ввиду роста трудноизвлекаемых ресурсов и запасов углеводородов более актуальным становится изучение карбонатных пород сложного строения, в частности задонско-елецких отложений верхнедевонско-турнейского нефтегазоносного комплекса Денисовского прогиба Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Как известно, девонский период в истории Тимано-Печорского бассейна имеет важное значение в связи с обширным развитием рифовых отложений, представляющих собой потенциальные зоны нефтегазоаккумуляции. Изучение общих черт строения и анализ материалов по результатам макро- и микропетрографических исследований керн позволит реконструировать фаціальную зональность и палеогеографические обстановки осадконакопления задонско-елецких рифогенных построек как перспективных объектов для поиска залежей нефти и газа.

Цель: изучить общие черты строения и литолого-петрографические особенности задонско-елецких рифогенных отложений Денисовского прогиба с целью реконструкции их фаціальной зональности, обстановок и условий формирования.

Объект: задонско-елецкие рифогенные отложения фаменского яруса верхнего девона южной части Денисовского прогиба Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции.

Методы: литолого-фаціальный анализ и палеогеографические реконструкции на основе анализа материалов, включающих комплекс геофизических исследований скважин, фотографии колонок и срезов керн, результаты изучения карбонатности пород, литолого-седиментологического описания керн, а также фотографии и микропетрографическое описание шлифов.

Результаты. Представлены результаты изучения раннефаменских рифогенных отложений, являющихся потенциальными зонами нефтегазоаккумуляции на территории юга Денисовского прогиба Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Прослежена изменчивость пород по разрезу и площади изучаемого района, что позволило выделить четыре литотипа пород, которые объединяются в две группы. Изучен вещественный состав пород на основе анализа определений карбонатности. Породы на 93–98 % сложены карбонатными минералами – кальцитом и доломитом. Макро- и микропетрографический анализ структурно-текстурных особенностей литотипов с использованием широко известной модели стандартных фаціальных поясов, разработанной Дж. Уилсоном, позволил провести реконструирование фаціальных обстановок осадконакопления раннефаменских отложений. Породы накапливались в трех фаціальных зонах мелководно-шельфовой карбонатной платформы: передового склона, микробаиального холма и мелководья, что определило их сложное полифаціальное строение.

Ключевые слова:

Фации, литолого-фаціальная зональность, задонско-елецкие отложения, верхний девон, Денисовский прогиб, Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция

Введение

В связи с увеличением доли трудноизвлекаемых ресурсов и запасов углеводородов все актуальнее становится вопрос изучения карбонатных пород-коллекторов, характеризующихся сложным строением порового пространства. В Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (НГП) одним из основных объектов добычи углеводородов является верхнедевонско-турнейский терригенно-карбонатный нефтегазоносный комплекс (НГК), значимые ресурсы и запасы в котором сосредоточены в рифогенных породах-коллекторах задонского и елецкого горизонтов раннефаменского возраста.

Значимый вклад в изучение строения и продуктивности задонского и елецкого горизонтов в составе верхнедевонско-турнейского НГК Тимано-Печорского региона внесли многие ученые: А.А. Алабушин, А.И. Антошкина, Н.В. Беляева, Б.П. Богданов, В.А. Дедеев, В.А. Жемчугова, В.В. Меннер, Н.И. Никонов, А.А. Отмас, Л.В. Пармузина, О.М. Прищепа и

др. Большой объем геолого-разведочных работ, выполненных научными и производственными организациями: ФГБУ «ВНИГНИ», АО «ВНИГРИ», ООО «ТП НИЦ», ИГКНЦ РАН, ИПНГ РАН, ФГБОУ ВО УГТУ, ОАО «Севергеофизика», ОАО «Нарьянмар-сейсморазведка», ПАО «ЛУКОЙЛ» и др. [1], в начале XXI в., позволил открыть достаточно крупные залежи нефти в рифогенных отложениях.

Существенный объем сейсморазведочных и буровых работ, проведенных на юге Денисовского прогиба в 2000–2010-х гг. [2, 3], позволил выявить ряд продуктивных структур: Восточно-Ламбейшорскую, Баяндыскую, Северо-Ипатскую, Южно-Ипатскую и др., промышленные запасы и прогнозные ресурсы углеводородов которых связаны с органогенными постройками задонского и елецкого возраста и пластами их облекания. Данные продуктивные постройки по своему строению аналогичны верхнедевонским нефтеносным рифам Камского-Кинельского типа Волго-Уральской НГП. Как известно, крупные ресурсы и

запасы нефти в верхнедевонских рифах Камско-Кинельской системы прогибов установлены на территории Пермского края [4–6], Республик Башкирия [7–9] и Татарстан [10, 11], Оренбургской области [12–14] и др. Важным показателем является то, что верхнедевонские рифогенные постройки продуктивны в ряде некоторых крупных нефтегазоносных бассейнов (НГБ) мира. Так, в Северной Америке в Западно-Канадском НГБ [15–17] в средне-позднедевонских рифах, образующих серию органо-генных построек, открыто около 350 нефтяных и газовых месторождений, суммарные запасы нефти которых оцениваются приблизительно в 800 млн т. Залежи сконцентрированы в трех основных ареалах рифовых зон нефтегазонакопления – Форт-Нельсон, Центральный и Юго-Восточный. Также промышленная нефтегазоносность верхнедевонских рифов доказана в крупном НГБ Кэннинг на северо-западе Австралийской платформы [18–20]. Помимо этого, рифогенные верхнедевонские отложения известны и в других частях света: в провинциях Юньнань, Гуйчжоу, Хунань и Гуанси Южного Китая [21, 22], в районе Рейнских Сланцевых гор и Гарце в Германии [23, 24], на северо-западе Африки (Марокко) [25, 26], в центральной части Ирана [27, 28], в России на Урале, в районе Салаир, Горного Алтая и в основании Западно-Сибирской эпигерцинской плиты [29]. Таким образом, позднедевонское рифообразование считается значимым периодом в истории позднего палеозоя и имеет широкую географию мирового уровня.

Как отмечает Л.В. Пармузина [30], важной особенностью рифогенных отложений изучаемого разреза Тимано-Печорской НГП является то, что они представляют собой нетипичные карбонатные массивы в связи с отсутствием в них организмов рифостроителей, которые способны формировать устойчивый каркас пород. Поэтому исследователи относят их к особым типам рифовых построек. Т.И. Кушнарева интерпретирует данный тип отложений как рифы, В.Н. Тихий – как «иловые холмы» (агглютигермы), В.В. Меннер – как карбонатные банки, А.И. Антошкина – как микробиальные холмы [31].

Рифогенные отложения задонского и елецкого горизонтов Денисовского прогиба характеризуются значительной неоднородностью литологического состава и порового пространства по разрезу и площади [32]. Вскрытые скважинами разрезы, находящиеся друг от друга на незначительном расстоянии, могут иметь существенные различия, что связано с особенностями осадконакопления, в частности с фациальной зональностью, циклами седиментации и постседиментационными преобразованиями пород. Детальное исследование задонских и елецких отложений, фациальный анализ и палеогеографические реконструкции их осадконакопления представляют особую важность для установления условий формирования рифовых построек, являющихся перспективными для поиска углеводородов.

Цель данной работы – реконструкция фациальной зональности и палеогеографических обстановок осадконакопления задонских и елецких карбонатных отложений фаменского яруса верхнего девона на основе

изучения особенностей строения разреза и анализа результатов макро-, микропетрографических исследований керна Восточно-Ламбейшорского, Баяндынского и Южно-Ипатского месторождений. В тектоническом отношении район исследования приурочен к Лайскому валу и Лодминской перемычке южной части Денисовского прогиба (рис. 1), который представляет собой крупную отрицательную структуру размерами 350×80 км. Прогиб расположен между Печоро-Кожвинским и Колвинским мегавалами и наиболее выражен по верхнепалеозойским отложениям. В нефтегазогеологическом отношении район исследования относится к Лайско-Лодминскому нефтегазоносному району (НГР) Печоро-Колвинской нефтегазоносной области (НГО).

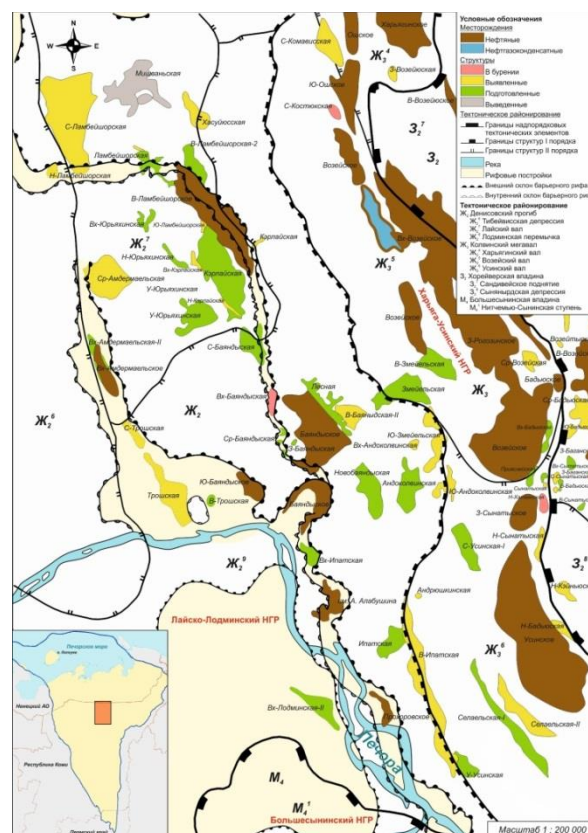


Рис. 1. Обзорная карта южной части Денисовского прогиба и прилегающих территорий (ЛУКОЙЛ-Инжиниринг, 2017 [33], с изменениями авторов)

Fig. 1. Overview map of the southern part of the Denisov depression and adjacent areas (LUKOIL-Engineering, 2017 [33], with modifications by the authors)

Общие черты строения раннефаменских отложений

На территории Денисовского прогиба разрез нижнефаменского яруса представлен в объеме задонского (D_{3zd}) и елецкого (D_{3el}) горизонтов, формировавшихся преимущественно в мелководной и умеренно глубоководной зонах шельфа, границей которых служили барьерные рифовые сооружения. На мелководном шельфе накапливались преимущественно глинисто-карбонатные, а на глубоководном – депрессионные кремнисто-карбонатно-глинистые осадки и толщи за-

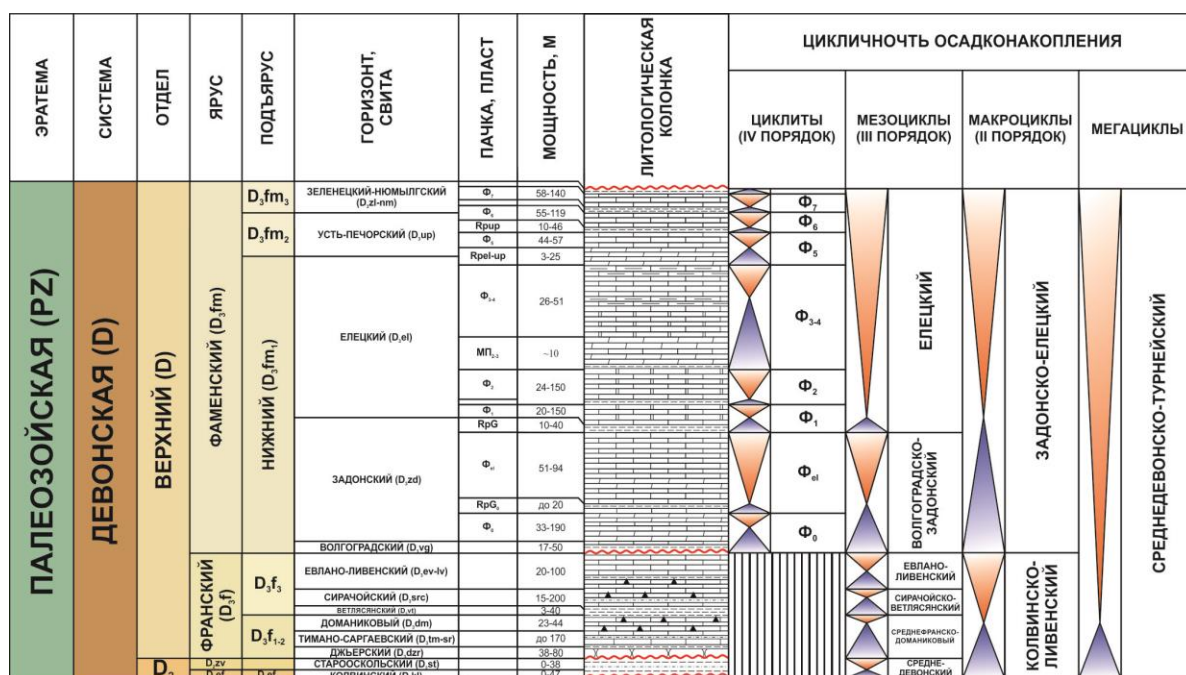


Рис. 3. Литолого-стратиграфическая схема и цикличность осадконакопления верхнедевонских отложений Денисовского прогиба

Fig. 3. Lithologic and stratigraphic scheme and cyclicity of sedimentation of Upper Devonian deposits of the Denisov depression

Первая группа – литотипы, у которых исходные компоненты в процессе осадконакопления были скреплены между собой (баундстоуны), а вторая группа – литотипы, у которых исходные компоненты не были скреплены между собой при осадконакоплении (рудстоуны, грейнстоуны, пакстоуны). Литологическая характеристика разновидностей пород представлена ниже. Примеры литотипов приведены в следующем разделе.

1. ЛТ 1 – Известняк пелоидный, интракластовый (рудстоун, пакстоун и грейнстоун). Породы коричнево-серого, светло-серого и серого цвета. Текстура пород: стилолитовая, трещиноватая, кавернозно-пористая, пористая, пятнистая, линзовидно-пятнистая, обусловлена неравномерной перекристаллизацией, доломитизацией, пигментацией битумом, ориентированная, беспорядочная. Породы сложены пелоидами и интракластами. Локально наблюдаются водорослевые желваки (онколиты, онкоиды) концентрического строения уплощенной формы, образованные нитями синезеленых водорослей, которые наматывались на интракласты, пелоиды и биокласты. Встречается редкий детрит остракод, гастропод, водорослей и криноидей. Форменные элементы сцементированы яснокристаллическим тонко-мелкозернистым, тонкозернистым и разнотоннозернистым кальцитом. Локально цементом служит микритовый кальцит. Тип цемента поровый, порово-базальный, базальный, участками инкрустационный. Вторичное минералообразование представлено процессами кальцитизации, доломитизации, слабо развитыми процессами пиритизации и окремнения. В породе развиты стилолиты, локально встречаются редкие

трещины. Породы данного литотипа пористые и кавернозно-пористые. Открытая пористость варьирует в пределах от 0 до 15 %. Пористость неравномерная.

- ЛТ 2 – Известняк оолитовый, пелоидно-оолитовый, оолитово-пелоидный, интракластово-оолитовый (грейнстоун). Породы коричнево-серого цвета. Текстура пород слоистая, линзовидно-слоистая, неяснопятнисто-слоистая, пятнисто-слоистая, пористая. Микроскопически породы сложены оолитами и реже онкоидами. Кроме них среди форменных элементов встречаются интракласты, пелоиды и биокласты. Форменные элементы сцементированы яснокристаллическим кальцитом тонко-мелкозернистой и разнотоннозернистой размерности. Тип цемента поровый и инкрустационный. Доломитизация не превышает 10 %. Породы данного литотипа плотные и крепкие, неравномерно пигментированы битумом. Единичные слабоволнистые трещины выполнены тонкозернистым спаритовым кальцитом.
- ЛТ 3 – Известняк микробийный, микробийно-детритовый (баундстоун). Породы от светло-серого до серо-коричневого цвета. Текстура пятнистая, слоисто-пятнистая, линзовидная, обусловлена неравномерной пигментацией битуминозно-органическим веществом (БОВ) и доломитизацией, стилолитовая, пористая, кавернозно-пористая, трещиноватая. Породы сложены сгустками и комочками микробийного происхождения. Породы крепкие, плотные. Основная масса породы комковатая. Порода стилолитизирована, доломитизирована, нефтенасыщена. Форменные элементы сцементированы новообразованным кальцитом

тонкозернистой, тонко-мелкозернистой, среднезернистой, мелко-тонкозернистой, мелкозернистой, разнотонкозернистой размерности. Тип цемента поровый, базально-поровый, крустификационный, спаритовый. На фоне основной микробияльной массы отмечаются гнезда (фенестральные полости или фенестры), заполненные новообразованным кальцитом. В микробияльных байндстоунах среди органических остатков преобладают кальцитовые сферы. В подчиненном количестве в породе фиксируются раковинки остракод, изредка отмечаются чехлы зеленых водорослей и редко фрагменты строматопороидей. Органические остатки неравномерно по интенсивности перекристаллизованы, участками выщелочены. Порода в разной степени доломитизирована, перекристаллизована, сульфатизирована и кальцитизирована. Наиболее ярко развиты процессы доломитизации. Порода доломитистая и доломитовая. Пиритизация и окремнение развиты незначительно. Порода стилолитизирована. Отмечаются редкие протяженные открытые трещины, секущие форменные элементы, вертикальные и наклонные минеральные и открытые трещинки. Пористость этого литотипа незначительная, в единичных случаях достигает 7 %.

4. ЛТ 4 – *Доломит вторичный* среднекрупнозернистый, крупно-среднезернистый, реже среднезернистый известковистый и известковый серого и коричневатого-серого цвета с редкими глинистыми слоями, сульфатизированный, участками пиритизированный, стилолитизированный, неравномерно пористо-кавернозный и кавернозно-пористый, трещиноватый, неравномерно пигментированный БОВ, со следами нефтенасыщения. Текстура пятнистая, обусловлена неравномерной пигментацией БОВ, сульфатизацией и пиритизацией породы, слоистая, трещиноватая, пористо-кавернозная, кавернозно-пористая, пористая, стилолитовая. Порода сложена зернами доломита (от 66 до 97 %) изометричной, многогранной, неправильно-ромбоэдрической и ромбоэдрической формы. Упаковка зерен преимущественно плотная, участками рыхлая. Эпизодически наблюдаются реликты первичной породы (0–15 %) – микробияльно-детритового известняка, представленные пелитоморфными кальцитовыми сгустками и комочками с обилием кальцисфер.

Анализ определений карбонатности задонско-елецких отложений позволил определить вещественный состав выделенных литотипов. На круговых диаграммах (рис. 5) продемонстрированы результаты средних содержаний карбонатных минералов (кальцита и доломита) и нерастворимого остатка (НО) в литотипах.

На основе полученных соотношений представлены следующие выводы:

- известняк пелоидный, интракластовый (ЛТ 1) и известняк микробияльный, микробияльно-детритовый (ЛТ 3) имеют практически идентичный вещественный состав и сложены преимущественно кальцитом (89–91 %), на доломит приходится около 7 %;

- для известняка оолитового, пелоидно-оолитового, оолитово-пелоидного, интракластово-оолитового (ЛТ 2) по сравнению с охарактеризованными выше литотипами свойственно более низкое содержание кальцита (82 %) и почти вдвое выше содержание доломита (~11 %) и НО (~7 %);
- среди всех литотипов ЛТ 4, состоящий из вторичных доломитов, имеет иное содержание карбонатных минералов и преимущественно сложен доломитом (89 %).

Различное соотношение кальцита, доломита и НО в литотипах указывает на неидентичные условия осадконакопления и постседиментационные преобразования.

Высокие концентрации кальцита в ЛТ 1 и ЛТ 3, вероятно, свойственны зоне накопления продуктов разрушения рифогенных построек и формирования «иловых холмов».

Более низкое содержание кальцита в ЛТ 2, возможно, характерно для зоны, где усиливается влияние песчано-глинистого материала, переносимого с суши, т. е. зарифового шельфа.

Преобладание минерала доломита в ЛТ 4 указывает, вероятно, на постседиментационное преобразование первичных микробияльных известняков.

Результаты фациальных и палеогеографических реконструкций

На основе широко применяемой за рубежом и в России модели стандартных фациальных поясов Дж. Уилсона и выделенных ранее авторами литотипов задонско-елецких рифогенных отложений было проведено реконструирование фациальных обстановок осадконакопления.

На рис. 6 приведена схема стандартных фациальных поясов с привязкой к ней выделенных литотипов на основе их литогенетических особенностей, которые отражают характер седиментации, выраженный в структурно-текстурном строении осадков.

Согласно построенной схеме, литотипы задонско-елецких отложений южной части Денисовского прогиба характеризуют обстановки осадконакопления в пределах мелководья, рифогенной зоны и передового склона. ЛТ 1, 2 – известняки пелоидные, интракластовые, оолитовые и оолитные (рудстоуны, грейнстоуны, пакстоуны) сформировались в условиях высокоподвижной водной среды в результате разрушения и перемыва течениями и волнениями рифовых построек – «иловых холмов». Рифовые грубообломочные известняки (рудстоуны) (рис. 6, а) определяют обстановки передового склона рифогенной постройки. Зернистые разновидности известняков – грейнстоуны и пакстоуны – характерны для зарифового мелководья (оолитовые и оолитные известняки) (рис. 6, з–е), но также и для передового склона (рис. 6, б). ЛТ 3 – микробияльные, микробияльно-детритовые известняки (баундстоуны) (рис. 6, ж–и) – типичные рифогенные отложения, образующие органогенную постройку – «иловый холм» – на краю карбонатной платформы. ЛТ 4 – вторичные доломиты (рис. 6, к–м) представляют собой продукт, сформировавшийся в результате замещения доломитами известкового осадка либо литифицированных микробияльных известняков.

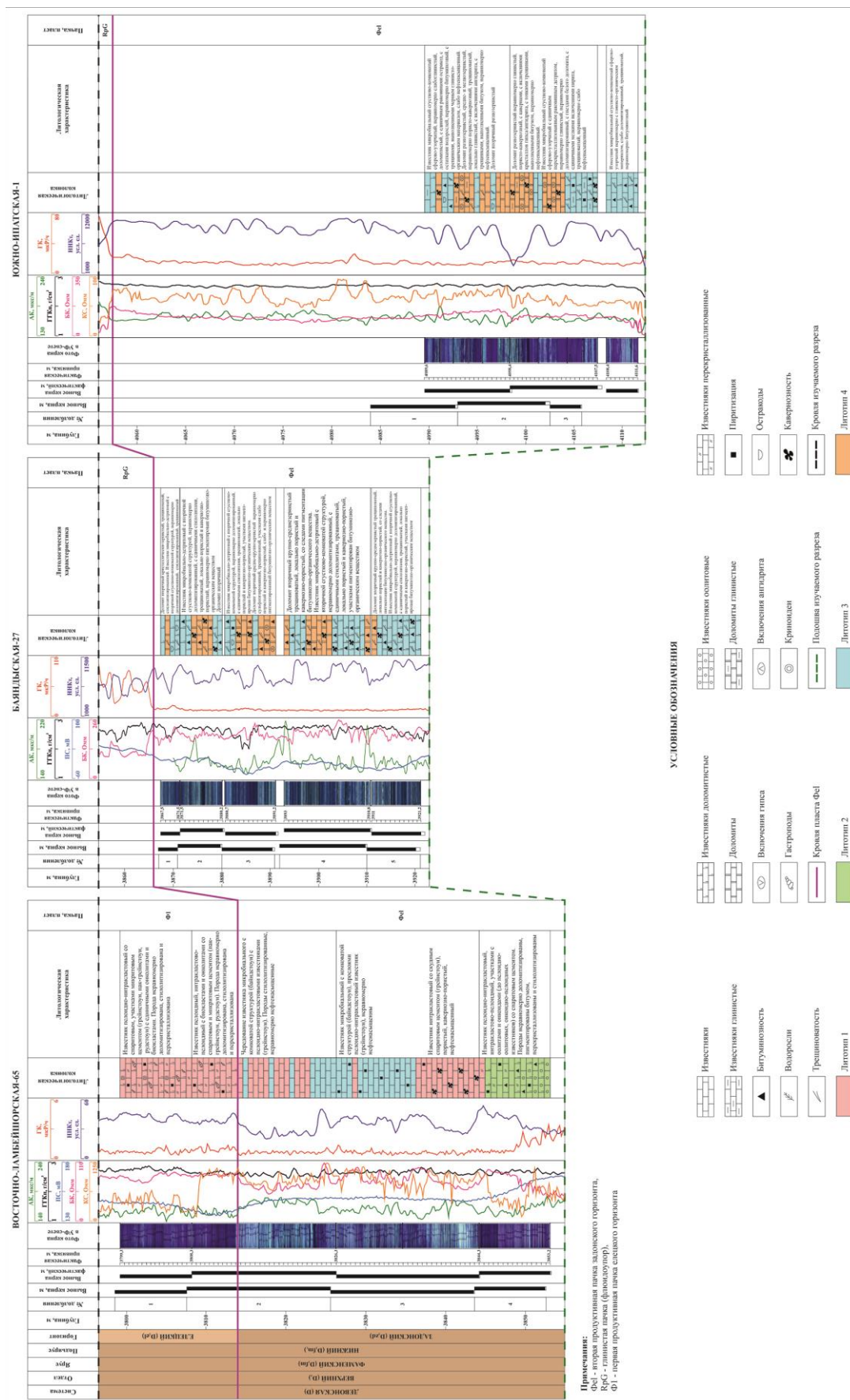


Рис. 4. Схема корреляции задонско-елецких отложений по линии скважин Восточно-Ламбейшорская-65, Баяндыская-27 и Южно-Ипатская-1, с изменением литотипов пород по разрезу и площади юга Денисовского прогиба

Fig. 4. Scheme of correlation of the Zadon-Elets sediments along the East-Lambeysshore-65, Bayandy-27 and South-Ipat'sk-1 wells, with changes in rock lithotypes along the section and area of the southern Denisov depression

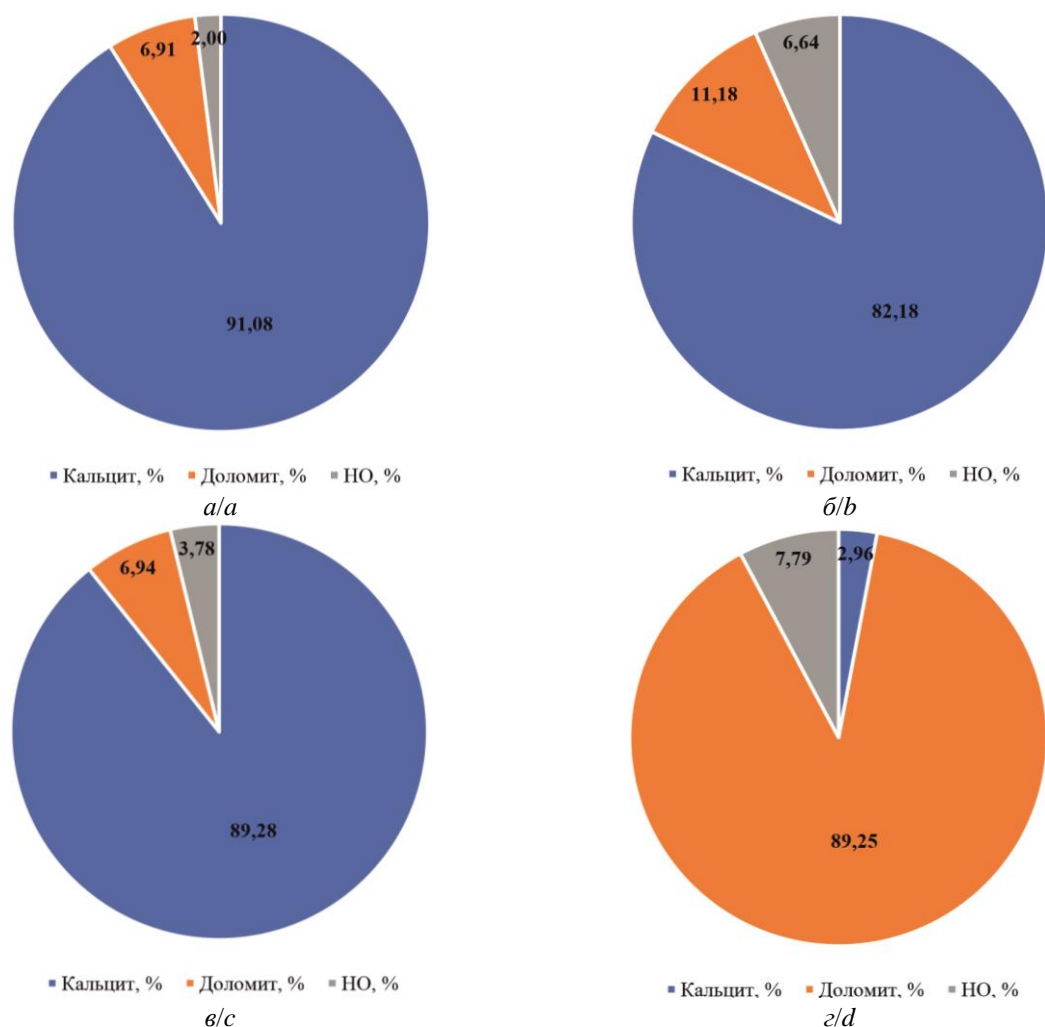


Рис. 5. Круговые диаграммы соотношения среднего содержания кальцита, доломита и НО в литотипах задонско-елецких отложений: а) ЛТ 1; б) ЛТ 2; в) ЛТ 3; г) ЛТ 4

Fig. 5. Pie charts of the average calcite, dolomite, and insoluble residue content ratios in the lithotypes of the Zadon-Eletsik sediments: а) LT 1; б) LT 2; в) LT 3; г) LT 4

Таким образом, интерпретация обстановок седиментации литотипов задонско-елецких отложений изучаемых скважин показывает, что область мелководно-шельфового осадконакопления Денисовского прогиба характеризуется полифациальным строением. Породы из скв. Восточно-Ламбейшорская-65 откладывались в пределах трех фациальных зон – передового склона, рифогенной зоны и зарифового мелководья. Иная картина наблюдается для отложений из разрезов скв. Баяндыская-27 и Южно-Ипатская-1, где породы формировались на краю платформы в виде рифогенной постройки – «микробийного холма», и частично подверглись постседиментационным изменениям в виде замещения известняков вторичными доломитами.

Формированию раннефаменских отложений предшествовало региональное прогибание в франское время территории Тимано-Печорского бассейна, вследствие чего произошло заложение относительно глубоководного бассейна с некомпенсированным осадконакоплением. В среднем фране бассейн достиг максимальных размеров. В дальнейшем, на протяжении позднего фране, темпы погружения территории

замедлились и резко сократилась площадь распространения умеренно-глубоководного шельфа. В фаменском веке произошел ряд трансгрессивно-регрессивных циклов, но в целом нисходящие движения бассейна имели незначительную интенсивность и характер постепенного затухания. Тем самым область некомпенсированного (депрессивного) осадконакопления значительно переместилась в восточную часть Тимано-Печорского бассейна.

Территория юга Денисовского прогиба в раннефаменское время представляла собой карбонатную платформу с цепочкой «микробийных холмов», вытянутых в субмеридиональном направлении. Под «микробийными холмами» подразумеваются постройки, морфологически выраженные в рельефе мелководного шельфа в виде рифогенных массивных толщ. Распределение литотипов задонско-елецких пород по разрезу и площади изучаемой территории указывает на существование в раннефаменское время различных обстановок седиментации в области микробийных холмов, обрамленных с запада мелководным шельфом, а с востока – депрессионной впадиной (рис. 7).

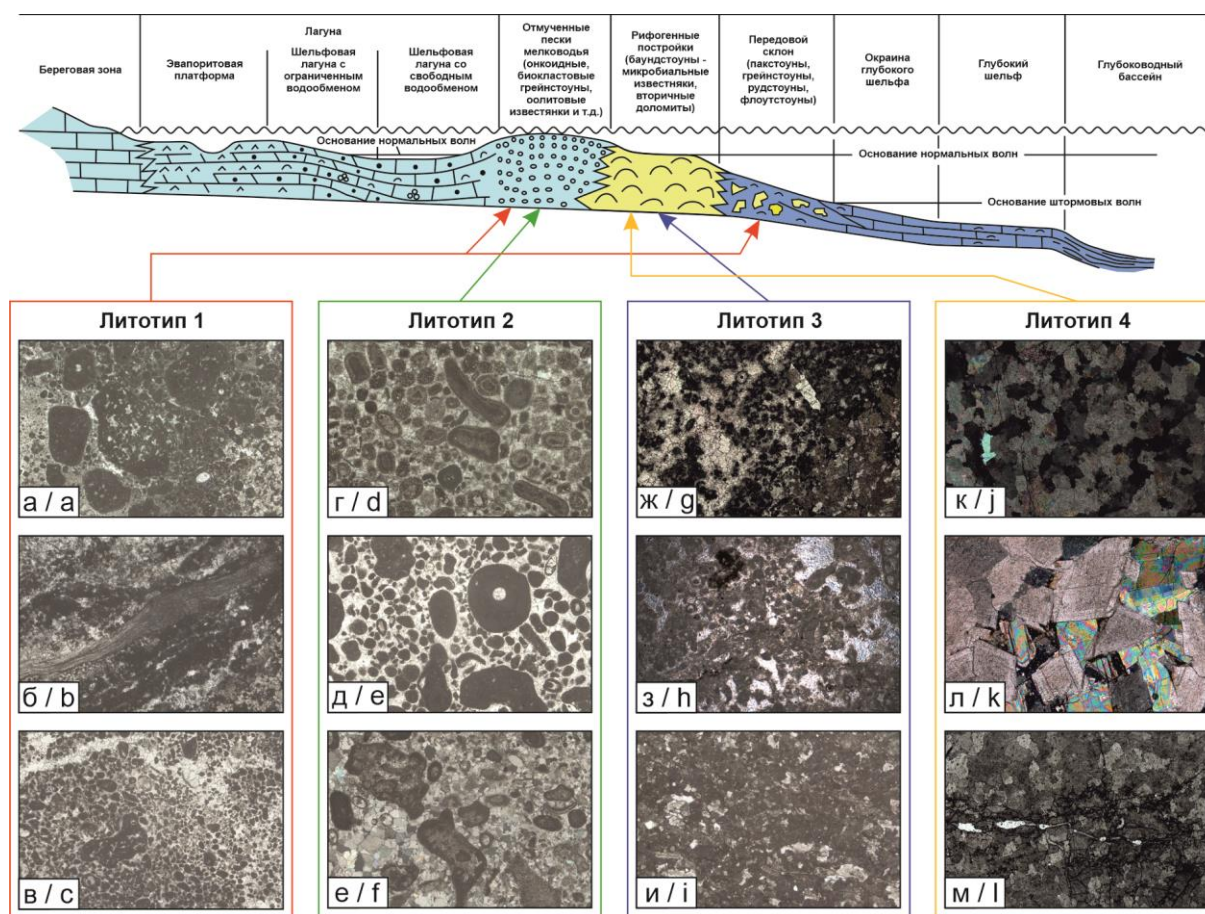


Рис. 6. Примеры выделенных литотипов задонско-елецких отложений с привязкой к схеме стандарта фациальных поясов Дж. Уилсона. ЛТ 1 (скв. Восточно-Ламбейшорская-65, D_3zd-el): а) известняк пеллоидно-интракластовый (рудстоун); б) известняк биокластово-пеллоидный (пакстоун и грейнстоун); в) известняк пеллоидный (грейнстоун); ЛТ 2 (скв. Восточно-Ламбейшорская-65, D_3zd): г) известняк оолитовый (грейнстоун); д) известняк онкоидно-пеллоидный (грейнстоун); е) известняк интракластово-оолитовый (грейнстоун); ЛТ 3: ж) известняк микробный (баундстоун), скв. Южно-Ипатская-1, D_3zd ; з) известняк микробно-детритовый (баундстоун), скв. Баянды-27, D_3zd ; и) известняк микробный (баундстоун), скв. Восточно-Ламбейшорская-65, D_3zd ; ЛТ 4: к) доломит вторичный, скв. Южно-Ипатская-1, D_3zd ; л) доломит вторичный, скв. Баянды-27, D_3zd ; м) доломит вторичный, скв. Южно-Ипатская-1, D_3zd

Fig. 6. Examples of identified lithotypes of the Zadon-Elets sediments with relation to the scheme of J. Wilson's standard facies belts. LT 1 (well East Lambayshore-65, D_3zd-el): a) peloid-intraclastic limestone (rudstone); b) bioclastic-peloid limestone (pakstone and greinstone); c) peloid limestone (greinstone); LT 2 (well East-Lambeyshore-65, D_3zd): d) oolitic limestone (greinstone); e) oncoid-peloid limestone (greinstone); f) intraclastic-peloid limestone (greinstone); LT 3: g) microbial limestone (boudstone), well South Ipatisk-1, D_3zd ; h) microbial-detrital limestone (boudstone), well Bayandy-27, D_3zd ; i) microbial limestone (boudstone), well East-Lambeyshore-65, D_3zd ; LT 4: j) secondary dolomite, well South Ipatisk-1, D_3zd ; k) secondary dolomite, well Bayandy-27, D_3zd ; l) secondary dolomite, well South Ipatisk-1, D_3zd

Исходя из анализов палеогеографических схем юга Денисовского прогиба, можно отметить, что для раннезадонского времени характерно преимущественно развитие фаций с микробными холмами на севере и северо-западе территории и атоллвидных структур на юго-западе, во внутренней части которых обособились лагунные обстановки осадконакопления (Лайско-Лодминский атолл) (рис. 7, а). В позднезадонское время окраина мелководного шельфа значительно продвинулась на восток, что привело к широкому распространению зарифовых мелководно-

шельфовых обстановок с узкой цепочкой микробных холмов (барьерных рифов), протягивающихся в северо-западном и северо-восточном направлениях (рис. 7, б). По сравнению с позднезадонским бассейном раннеелецкий бассейн осадконакопления имел те же границы развития и контролировался преимущественно зарифовыми мелководно-шельфовыми обстановками седиментации и формированием на окраине мелководно-шельфового моря первых раннеелецких рифогенных построек (рис. 7, в).

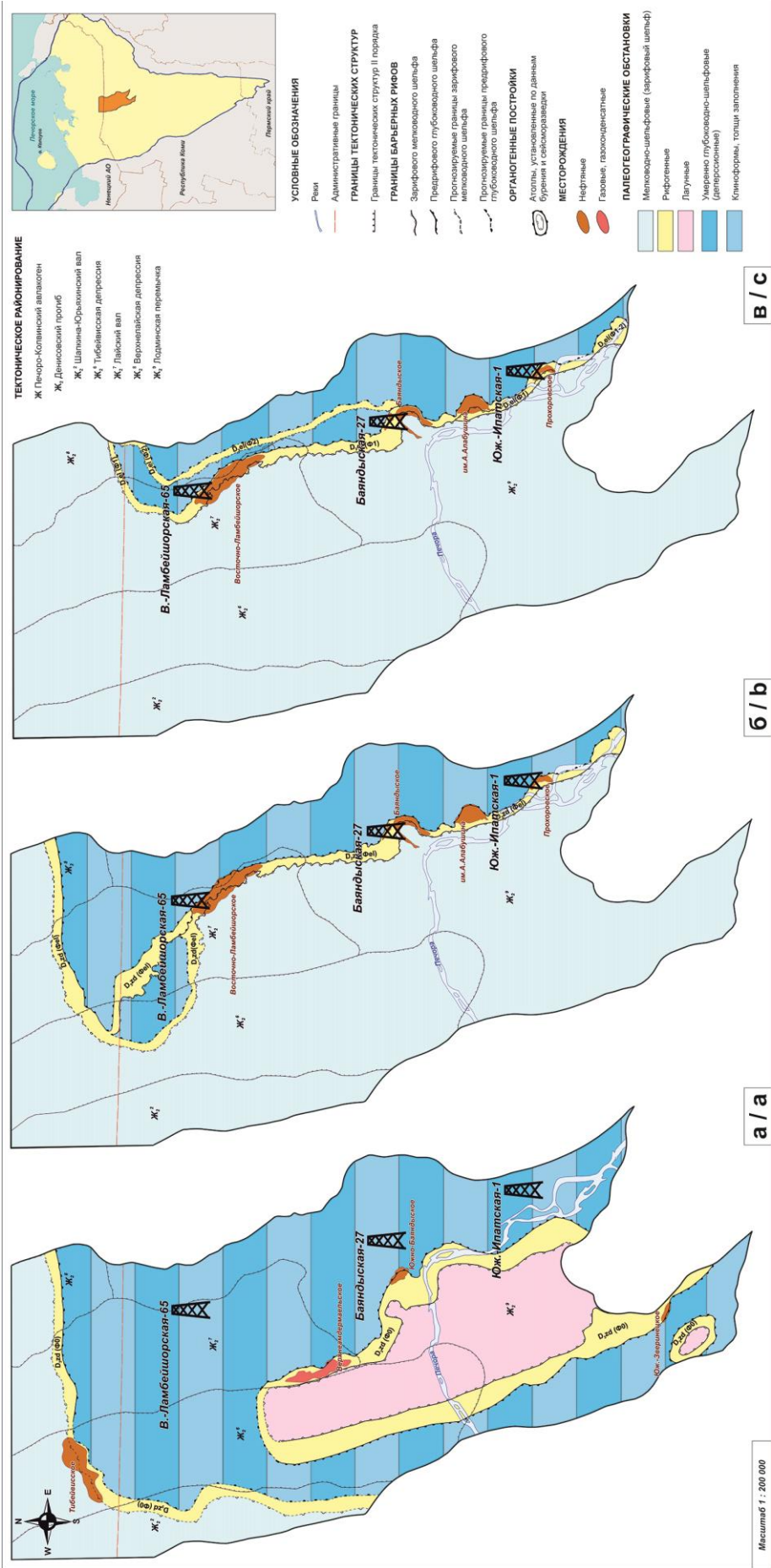


Рис. 7. Палеогеографические схемы юга Денисовского прогиба в раннем фениане (ТП НИЦ, 2019 [32], с изменениями авторов): а) раннезатонское время; б) позднезатонское время
в) раннезатонское время
Fig. 7. Paleogeographic schemes of the south of the Denisov depression in the Early Fenian (TP SRC, 2019 [32], with modifications by the authors): а) Early Zaton time; б) Late Zaton time
в) Early Zaton time

Заключение

Подводя итоги изучения условий формирования рифогенных раннефаменских отложений из разрезов трех скважин, расположенных на юге Денисовского прогиба, можно сделать следующие выводы. Анализ материалов литолого-седиментологических исследований керна и шлифов задонских и елецких рифогенных отложений позволил выделить среди них четыре литотипа пород, которые объединяются в две группы. К первой группе относятся баундстоуны – микробияльные и микробияльно-детритовые известняки, исходные компоненты у которых в процессе осадконакопления были скреплены между собой, а вторая группа – рудстоуны, грейнстоуны и пакстоуны – известняки пелоидные, интракластовые, оолитовые, пелоидно-оолитовые, оолитово-пелоидные, интракластово-оолитовые, исходные компоненты у которых не были скреплены между собой при осадконакоплении. Согласно анализу результатов определения карбонатности породы задонского и елецкого возраста на 93–98 % сложены карбонатными минералами – кальцитом и доломитом. Наибольшие концентрации кальцита свойственны ЛТ 1 и ЛТ 3, доломита – ЛТ 4.

Результаты реконструирования фациальных обстановок осадконакопления позволили установить, что накопление раннефаменских отложений происхо-

дило в трех фациальных зонах: передового склона (переходной к глубоководному шельфу), микробияльного холма (рифовой постройки) и мелководья (переходная к зарифовому мелководному шельфу). Согласно палеогеографическим схемам раннефаменского времени территория юга Денисовского прогиба представляла собой карбонатную платформу с развитой и вытянутой в преимущественно субмеридиальном направлении цепочкой барьерных рифов и широко распространенного зарифового мелководного моря.

Активный тектонический режим в позднедевонское время на территории Тимано-Печорского бассейна сыграл ключевую роль в образовании рифогенных толщ раннефаменского возраста. Трансгрессивно-регрессивные колебания уровня моря наряду с изменением климата и влиянием пресных вод, сносимых с суши, способствовали формированию полифациального строения рифогенных зон и их постседиментационным преобразованиям.

Полученные результаты изучения раннефаменских рифогенных отложений имеют важное значение при поиске перспективных структур на территории юга Денисовского прогиба.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00111.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колоколова И.В. Прогноз нефтегазоносности рифовых объектов в доманиково-турнейских природных резервуарах Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и системные оценки рисков геологоразведочных работ: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М.: ИПНГ РАН, 2021. – 135 с.
2. Саетгараев А.Д., Фатеев В.С., Соловьев С.И. Результаты поисково-разведочных работ ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» за период 2014–2018 гг. // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО Российской АН, Геопринт, 2019. – Т. I. – С. 35–37.
3. Саетгараев А.Д., Савельева А.А., Борщевская Н.И. Крупные открытия на рубеже XX–XXI веков // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО Российской АН, Геопринт, 2019. – Т. III. – С. 12–15.
4. Бояршинова М.Г., Уткина М.Н. Литолого-петрографическая характеристика и условия седиментации верхнедевонских карбонатных отложений в зоне рифового плато Зырянского рифа (Соликамская депрессия, Предуральский прогиб) // 13 Уральское литологическое совещание: материалы конференции. – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2020. – С. 27–29.
5. Бояршинова М.Г., Антонюк О.В., Уткина М.Н. Верхнедевонские микробиилиты Зырянского изолированного рифа (северная часть Волго-Уральской НГП) // Геология рифов: материалы Всероссийского литологического совещания. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО Российской АН, Геопринт, 2020. – С. 32–34.
6. Прогноз развития неантиклинальных ловушек углеводородов в верхнедевонско-турнейских карбонатных отложениях на территории северных районов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции / Н.Е. Соснин, С.Г. Филиппова, С.В. Макарова, Л.Ю. Корепанова, И.А. Виллоужева // Недрапользование. – 2021. – Т. 21. – № 4. – С. 156–162.
7. Закономерности распределения органогенных построек и залежей нефти в верхнедевонско-турнейском карбонатном комплексе в пределах платформенного Башкортостана / Н.А. Неудачин, Г.Р. Ханнанова, Р.В. Мирнов, П.А. Луканова, А.З. Вакилова // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 5. – С. 22–25.
8. Роль органогенных построек верхнедевонско-турнейского карбонатного комплекса в формировании ловушек и залежей УВ / Н.А. Неудачин, Р.В. Мирнов, П.А. Ахмерова, Г.Р. Вильданова // Геология и геофизика–2022 наука, производство, инновации: материалы II Международной научно-практической конференции. – Уфа, 2022. – С. 196–199.
9. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности доманикоидной высокоуглеродистой формации центральной части Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна / М.Ю. Карпушин, А.В. Ступакова, А.П. Завьялова, А.А. Суслова, В.В. Чупахина, К.А. Радченко // Георесурсы. – 2022. – Т. 24. – № 2. – С. 129–138.
10. Microfacies analysis and depositional environment of the Upper Devonian Dankovo-Lebedyansky sediments, Tatarstan, Volga-Ural Basin, Russia / Y. Ibrahim, V.P. Morozov, A.N. Kolchugin, V. Sudakov, I. Idrisov, A. Leontev // Petroleum Research. – 2022. – № 7. – P. 1–12.
11. Impact of microfacies and diagenesis on the reservoir quality of Upper Devonian carbonates in Southeast Tatarstan, Volga-Ural Basin, Russia / Y. Ibrahim, V.P. Morozov, A.N. Kolchugin, A. Leontev, Tahhan Fatmeh // Petroleum Research. – 2022. – № 10. – P. 1–18.
12. Николаева Л.А., Филиппов Е.В., Поливанов С.А. Перспективы нефтегазоносности карбонатного комплекса девонских отложений на севере Оренбургской области // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 10. – С. 20–24.
13. Верхнепалеозойские рифовые системы Рубежинского прогиба южная часть Бузулукской впадины / А.П. Вилесов, В.С. Леде-нев, Д.В. Солодов, А.В. Филичев, Н.В. Богомолова, Л.И. Макарова, Н.Ю. Гребенкина, А.Г. Казачкова, А.С. Сидубаев // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 3. – С. 30–42.
14. Кузьмина В.В., Котенев Ю.А. Литолого-фациальная неоднородность сложных коллекторов верхнедевонских рифов Оренбургской области // XX научно-практическая конференция «Инновационные решения в геологии и разработке ТРИЗ». – М., 2021. – С. 215–223.

15. Кузнецов В.Г., Журавлева Л.М. Рифовые образования Западно-Канадского бассейна и их нефтегазоносность // Литология и полезные ископаемые. – 2018. – № 3. – С. 257–273.
16. A reservoir model for geothermal energy production from the Middle Devonian Slave Point Formation / E. Renaud, J.A.W. Weissenberger, N.B. Harris, J. Banks, B. Wilson // Marine and Petroleum Geology. – 2021. – V. 129. – № 5. – P. 1–24.
17. Higley D.K. Assessment of undiscovered conventional oil and gas resources of the Western Canada Sedimentary Basin, Canada // National and Global Petroleum Assessment. – 2012. – № 2012-3148. – P. 1–4.
18. Забанбарк А. Структурные черты и перспективы нефтегазоносности бассейнов западной и северо-западной окраин Австралии // Океанология. – 2010. – Т. 50. – № 2. – С. 292–305.
19. Hydrogen storage potential of depleted oil and gas fields in Western Australia / A. Craig, S. Newman, P. Stephenson, Ch. Evans, Sh. Yanczos, S. Barber // The APPEA Journal. – 2022. – V. 62. – № 1. – P. 185–195.
20. Assessment of undiscovered oil and gas resources in the Canning Basin Province, Australia / Ch.J. Schenk, M.E. Tennyson, T.J. Mercier, Ch.A. Woodall, Th.M. Finn, Ph.A. Le, M.E. Brownfield, S.B. Gaswirth, K.R. Marra, H.M. Leathers-Miller // National and Global Petroleum Assessment. – 2018. – № 2018-3023. – P. 1–4.
21. Chang-Min Yu, Yue Li, Kun Liang. Devonian reef development and strata-bound ore deposits in South China // Journal of Palaeogeography. – 2021. – V. 10. – № 4. – P. 571–583.
22. Jianwei Shen, Webb G.E., Hairuo Qing. Microbial mounds prior to the Frasnian-Famennian mass extinctions, Hantang, Guilin, South China // Sedimentology. – 2010. – V. 57. – P. 1615–1639.
23. Кузнецов В.Г. Асинхронность развития рифов и рифостроящей биоты. Палеозой // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 54–62.
24. Bond D.P.G., Wignall P.B., Racki G. Extent and duration of marine anoxia during the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction in Poland, Germany, Austria and France // Geological Magazine. – 2004. – V. 141. – № 2. – P. 173–193.
25. Jobst Wendt. Middle and Late Devonian sea-level changes and synsedimentary tectonics in the eastern Anti-Atlas (Morocco) // Journal of African Earth Sciences. – 2021. – V. 182. – P. 1–16.
26. Eichholt S., Becker R.T. Middle Devonian reef facies and development in the Oued Cherrat Zone and adjacent regions (Moroccan Meseta) // Facies. – 2016. – V. 62. – № 7. – P. 1–29.
27. Palaeoenvironmental and sequence-stratigraphic analysis of the Middle-Late Devonian carbonates (Bahram Formation) of Anarak, western Central Iran / Mohammad Ali Salehi, Ali Bahrami, Sanaz Moharrami, Hossein Vaziri-Moghaddam, Hamid Reza Pakzad, Bahareh Shakeri // Journal of African Earth Sciences. – 2020. – V. 171. – № 4. – P. 1–18.
28. Devonian/Lower Carboniferous stratigraphy, facies patterns and palaeogeography of Iran. Part II. Northern and central Iran / J. Wendt, B. Kaufmann, Z. Belka, N. Farsan, A. Bavandpur // Acta Geologica Polonica. – 2005. – V. 55. – № 1. – P. 31–97.
29. Девонские рифогенные образования Урала и смежных территорий Восточно-Европейской платформы и Западной Сибири / Б.И. Чувазов, Н.В. Сенников, А.Л. Анфимов, Н.К. Бахарев, Н.Г. Изох // Литосфера. – 2015. – № 4. – С. 43–61.
30. Пармузина Л.В. Верхнедевонский комплекс Тимано-Печорской провинции (строение, условия образования, закономерности размещения коллекторов и нефтегазоносность). – СПб.: Недра, 2007. – 151 с.
31. Матвеева Н.А. Условия образования фаменских рифогенных отложений Центрально-Хорейверского вала Тимано-Печорской провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – Т. 12. – № 2. – С. 1–28.
32. Петренко Е.Л. Перспективы нефтегазоносности полифациальных верхнедевонских отложений в южной части Денисовской впадины // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. – Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО Российской АН, Геопринт, 2019. – Т. III. – С. 95–98.
33. Даниленко А.Н., Савельева А.А., Борщевская Н.И. Новые данные о геологическом строении и перспективах нефтегазоносности рифогенных отложений верхнего девона Денисовского прогиба // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 2. – С. 41–45.
34. Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture: Classification of carbonate rocks // American Association of Petroleum Geologists Memoir. – 1962. – V. 1. – P. 108–121.
35. Wilson J.L. Carbonate facies in geologic history. – Berlin: Springer-Verlag, 1975. – 471 p.

Поступила 26.09.2022 г.

Дата рецензирования: 06.12.2022 г.

Информация об авторах

Кривошеков С.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Боталов А.Н., младший научный сотрудник кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 553.98:551.83:551.734.5

STRUCTURAL FEATURES AND FORMATION CONDITIONS OF EARLY FAMENIAN RIFFOGENIC SEDIMENTS IN THE SOUTHERN PART OF THE DENISOV DEPRESSION OF THE TIMAN-PECHORA OIL AND GAS PROVINCE

Sergey N. Krivoschekov¹,
krivoschekov@gmail.com

Andrey N. Botalov¹,
botalov97@yandex.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

Relevance. Currently, due to the growth of hard-to-recover resources and hydrocarbon reserves, the study of carbonate rocks of complex structure, in particular the Zadon-Eelets sediments of the Upper Devonian-Tournaisian oil and gas complex of the Denisov depression of the Timan-Pechora oil and gas province, is becoming more relevant. As it is known, the Devonian period in the history of the Timan-Pechora basin is of great importance due to the extensive development of reef sediments, which represent potential zones of oil and gas accumulation. The study of the general features of the structure and the analysis of materials based on the results of macro- and micropetrographic studies of the core will allow reconstructing the facies zonation and paleogeographic conditions of sedimentation of the Zadon-Eelets reef structures as promising objects for the search for oil and gas fields.

Aim: study the general features of the structure and lithological and petrographic features of the Zadon-Eelets riphogenic sediments of the Denisov depression, in order to reconstruct their facies zonation, environments and conditions of formation.

Objects: Zadon-Eelets riphogenic sediments of the Famennian Stage of the Upper Devonian in the southern part of the Denisov depression of the Timan-Pechora oil and gas province.

Methods: lithological-facies analysis and paleogeographic reconstructions based on the analysis of materials, including a complex of geophysical studies of wells, photographs of columns and sections core, the results of the study of carbonate content rocks, lithological-sedimentological description of the core, as well as photographs and micropetrographic description of the thin rock section.

Results. The paper introduces the results of the study of Early Famennian riphogenic sediments, which are potential zones of oil and gas accumulation in the south of the Denisov depression of the Timan-Pechora oil and gas province. The variability of rocks by section and area of the studied region was traced, which made it possible to identify four lithotypes of rocks that are combined into two groups. The material composition of rocks was studied based on the analysis of definitions of carbonate content. The rocks are composed of carbonate minerals – calcite and dolomite – by 93–98 %. Macro- and micropetrographic analysis of structural and textural features of lithotypes using the well-known model of standard facies belts, developed by J. Wilson, allowed reconstructing the facies conditions of sedimentation of the Early Famennian sediments. Rocks were accumulated in three facies zones of the shallow-shelf carbonate platform: an advanced slope, a microbial hill and shallow water, which determined their complex polyfacial structure.

Key words:

Facies, lithologic-facies zoning, Zadon-Eelets sediments, Upper Devonian, Denisov depression, Timan-Pechora oil and gas province.

The research was carried out using the funds of grant of the Russian Science Foundation no. 22-17-00111.

REFERENCES

- Kolokolova I.V. *Prognoz neftegazonosnosti rifyvnykh ob'yektov v domanikovo-turneyskikh prirodnykh rezervuarakh Timano-Pechorskoy neftegazonosnoy provintsii i sistemnye otsenki riskov geologorazvedochnykh rabot*. Diss. Kand. nauk [Prediction of oil and gas content of reef objects in the Domanic-Tournaisian natural reservoirs of the Timan-Pechora oil and gas province and system risk assessment of exploration. Cand. Diss.]. Moscow, 2021. 135 p.
- Sayetgaraev A.D., Fateev V.S., Solovyev S.I. *Rezultaty poiskovo-razvedochnykh rabot OOO «LUKOIL-Komi» za period 2014–2018 gg.* [Results of prospecting and exploration work by OOO LUKOIL-Komi for 2014–2018]. *Geologiya i mineralnye resursy Evropeyskogo Severo-Vostoka Rossii. Materialy XVII Geologicheskogo syezda Respubliki Komi* [Geology and mineral resources of the European North-East of Russia. Materials of the XVII Geological Congress of the Komi Republic]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Geoprint, 2019. Vol. I, pp. 35–37.
- Sayetgaraev A.D., Savelyeva A.A., Borshchevskaya N.I. *Krupnye otkrytiya na rubezhe XX–XXI vekov* [Major discoveries at the turn of the XX–XXI centuries]. *Geologiya i mineralnye resursy Evropeyskogo Severo-Vostoka Rossii. Materialy XVII Geologicheskogo syezda Respubliki Komi* [Geology and mineral resources of the European North-East of Russia. Materials of the XVII Geological Congress of the Komi Republic]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Geoprint, 2019. Vol. III, pp. 12–15.
- Boyarsheva M.G., Utkina M.N. *Litologo-petrograficheskaya kharakteristika i usloviya sedimentatsii verkhnedevonskikh karbonatnykh otlozheniy v zone rifovogo plato Zyryanskogo rifa (Solikamskaya depressiya, Predurskiy progib)* [Lithological and petrographic characteristics and sedimentation conditions of Upper Devonian carbonate sediments in the Zyryan reef plateau zone (Solikamsk depression, Pre-Ural trough)]. *13 Uralskoe litologicheskoe soveshchanie. Materialy konferentsii* [13th Ural lithological meeting. Conference materials]. Ekaterinburg, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, 2020. pp. 27–29.
- Boyarsheva M.G., Antonyuk O.V., Utkina M.N. *Verkhnedevonskie mikrobiolity Zyryanskogo izolirovannogo rifa (severnaya chast Volgo-Uralskoy NGP)* [Devonian microbialites of the Zyryan isolated reef (northern part of the Volga-Ural OGP)]. *Geologiya rifo. Materialy Vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya* [Geology of reefs. Materials of the All-Russian lithological meeting]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Geoprint, 2020. pp. 32–34.
- Sosnin N.E., Filippieva S.G., Makarova S.V., Korepanova L.Yu., Vilyuzheva I.A. *Prediction of non-anticlinal hydrocarbon traps de-*

- velopment in Upper Devonian-Tournaisian carbonate sediments in the northern regions of the Volga-Ural oil and gas province. *Subsoil Use*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 156–162. In Rus.
7. Neudachin N.A., Khannanova G.R., Mirnov R.V., Lukanova P.A., Vakilova A.Z. Laws of distribution of organogenic structures and oil accumulations in the Upper Devonian-Tournaisian carbonate complex within platformed Bashkortostan. *Oil industry*, 2020, no. 5, pp. 22–25. In Rus.
8. Neudachin N.A., Mirnov R.V., Akhmerova P.A., Vildanova G.R. Rol organogennykh postroek verkhnedevonsko-turneyskogo karbonatnogo kompleksa v formirovaniy lovushek i zalezhey UV [The role of organogenic structures of the Upper Devonian-Tournaisian carbonate complex in the formation of traps and HC accumulations]. *Geologiya i geofizika–2022 nauka, proizvodstvo, innovatsii. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Geology and geophysics–2022. Science, production, innovations. Materials of II International scientific and practical conference]*. Ufa, 2022. pp. 196–199.
9. Karpushin M.Yu., Stupakova A.V., Zavyalova A.P., Suslova A.A., Chupakhina V.V., Radchenko K.A. Geological structure and prospects of oil and gas content of the domanikoid high-carbon formation of the central part of the Volga-Ural oil and gas bearing basin. *Georesurs*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 129–138. In Rus.
10. Ibrahim Y., Morozov V.P., Kolchugin A.N., Sudakov V., Idrisov I., Leontev A. Microfacies analysis and depositional environment of the Upper Devonian Dankovo-Lebedyansky sediments, Tatarstan, Volga-Ural Basin, Russia. *Petroleum Research*, 2022, no. 7, pp. 1–12.
11. Ibrahim Y., Morozov V.P., Kolchugin A.N., Leontev A., Tahhan Fatme Impact of microfacies and diagenesis on the reservoir quality of Upper Devonian carbonates in Southeast Tatarstan, Volga-Ural Basin, Russia. *Petroleum Research*, 2022, no. 10, pp. 1–18.
12. Nikolaeva L.A., Filippov E.V., Polivanov S.A. Prospects of oil and gas bearing capacity of carbonate complex of Devonian sediments in the north of the Orenburg region. *Oil Industry*, 2020, no. 10, pp. 20–24. In Rus.
13. Vilesov A.P., Ledenev V.S., Solodov D.V., Filichev A.V., Bogomolova N.V., Makarova L.I., Grebenkina N.Yu., Kazachkova A.G., Sidubaev A.S. Upper Paleozoic reef systems of the Rubezhin depression south of the Buzuluk trough. *PRONEFT. Professionally about oil*, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 30–42. In Rus.
14. Kuzmina V.V., Kotenev Yu.A. Litologo-fatsialnaya neodnorodnost slozhnykh kollektorov verkhnedevonskikh rifov Orenburgskoy oblasti [Lithological and facial heterogeneity of complex reservoirs of Upper Devonian reefs of the Orenburg region]. *XX nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Innovatsionnye resheniya v geologii i razrabotke TRIZ [XX scientific-practical conference. Innovative solutions in geology and TRIZ development]*. Moscow, 2021. pp. 215–223.
15. Kuznetsov V.G., Zhuravleva L.M. Rifovye obrazovaniya Zapadno-Kanadskogo basseyna i ikh neftegazonosnost [Reef formations of the Western Canadian basin and their oil and gas content]. *Litologiya i poleznye iskopayemye*, 2018, no. 3, pp. 257–273.
16. Renaud E., Weissenberger J.A.W., Harris N. B., Banks J., Wilson B. A reservoir model for geothermal energy production from the Middle Devonian Slave Point Formation. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, vol. 129, no. 5, pp. 1–24.
17. Higley D.K. Assessment of undiscovered conventional oil and gas resources of the Western Canada Sedimentary Basin, Canada. *National and Global Petroleum Assessment*, 2012, no. 2012-3148, pp. 1–4.
18. Zabanbark A. Structural features and prospects of oil and gas bearing basins of the Western and Northwestern margins of Australia. *Oceanology*, 2010, vol. 50, no. 2, pp. 292–305. In Rus.
19. Craig A., Newman S., Stephenson P., Evans Ch., Yancazos Sh., Barber S. Hydrogen storage potential of depleted oil and gas fields in Western Australia. *The APPEA Journal*, 2022, vol. 62, no. 1, pp. 185–195.
20. Schenk Ch.J., Tennyson M.E., Mercier T.J., Woodall Ch.A., Finn Th.M., Le Ph.A., Brownfield M.E., Gaswirth St.B., Marra K.R., Leathers-Miller H.M. Assessment of undiscovered oil and gas resources in the Canning Basin Province, Australia. *National and Global Petroleum Assessment*, 2018, no. 2018-3023, pp. 1–4.
21. Chang-Min Yu, Yue Li, Kun Liang. Devonian reef development and strata-bound ore deposits in South China. *Journal of Palaeogeography*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 571–583.
22. Shen J., Webb G.E., Q. Hairuo. Microbial mounds prior to the Frasnian-Famennian mass extinctions, Hantang, Guilin, South China. *Sedimentology*, 2010, vol. 57, pp. 1615–1639.
23. Kuznetsov V.G. Asynchrony of reef development and reef-building biota. Paleozoic. *Proceedings of higher educational institutions. Geology and Exploration*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 54–62. In Rus.
24. Bond D.P.G., Wignall P.B., Racki G. Extent and duration of marine anoxia during the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction in Poland, Germany, Austria and France. *Geological Magazine*, 2004, vol. 141, no. 2, pp. 173–193.
25. Middle J.W. Late Devonian sea-level changes and synsedimentary tectonics in the eastern Anti-Atlas (Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 2021, vol. 182, pp. 1–16.
26. Eichholt S., Becker R.Th. Middle Devonian reef facies and development in the Oued Cherrat Zone and adjacent regions (Moroccan Meseta). *Facies*, 2016, vol. 62, no. 7, pp. 1–29.
27. Mohammad Ali Salehi, Ali Bahrami, Sanaz Moharrami, Hossein Vaziri-Moghaddam, Hamid Reza Pakzad, Bahareh Shakeri. Palaeoenvironmental and sequence-stratigraphic analysis of the Middle-Late Devonian carbonates (Bahrami Formation) of Anarak, western Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, vol. 171, no. 4, pp. 1–18.
28. Wendt J., Kaufmann B., Belka Z., Farsan N., Bavandpur A. Devonian/Lower Carboniferous stratigraphy, facies patterns and palaeogeography of Iran. Part II. Northern and central Iran. *Acta Geologica Polonica*, 2005, vol. 55, no. 1, pp. 31–97.
29. Chuvashov B.I., Sennikov N.V., Anfimov A.L., Bakharev N.K., and Izokh N.G. Devonian rifting formations of the Urals and adjacent territories of the East European Platform and West Siberia. *Lithosphere*, 2015, no. 4, pp. 43–61. In Rus.
30. Parmuzina L.V. *Verkhnedevonskiy kompleks Timano-Pechorskoy provintsii (stroenie, usloviya obrazovaniya, zakonornosti razmeshcheniya kollektorov i neftegazonosnosti)* [Upper Devonian complex of the Timan-Pechora province (structure, conditions of formation, patterns of reservoir location and oil and gas content)]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2007. 152 p.
31. Matveeva N.A. Conditions of formation of Famennian rifting sediments of the Central-Khoreyver rampart of Timan-Pechora province. *Oil and Gas Geology. Theory and practice*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 1–28. In Rus.
32. Petrenko E.L. Perspektivy neftegazonosnosti polifatsialnykh verkhnedevonskikh otlozheniy v yuzhnoy chasti Denisovskoy vpadiny [Prospects for the oil and gas potential of polyfacial Upper Devonian deposits in the southern part of the Denisov Depression]. *Geologiya i mineralnye resursy Evropeyskogo Severo-Vostoka Rossii. Materialy XVI Geologicheskogo syezda Respubliki Komi* [Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: materials of the XVII Geological Congress of the Komi Republic]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Geoprint, 2019. Vol. III. pp. 95–98.
33. Danilenko A.N., Savelieva A.A., Borschevskaya N.I. New data on geological structure and oil-and-gas bearing perspectives of deposits in the Upper Devonian reefs of the Denisov Depression. *Oil Economy*, 2017, no. 2, pp. 41–45. In Rus.
34. Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture: Classification of carbonate rocks. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1962, vol. 1, pp. 108–121.
35. Wilson J.L. *Carbonate facies in geologic history*. Berlin, Springer-Verlag, 1975. 471 p.

Received: 26 September 2022.

Reviewed: 6 December 2022.

Information about the authors

Sergey N. Krivoschekov, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Andrey N. Botalov, junior researcher, Perm National Research Polytechnic University.