

Палеокарст, гидротермокарст и карстовые коллекторы франских рифов Рыбкинской группы

А.П. Вилесов*, К.Н. Чертина

ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

Более 20-ти одиночных франских рифов Рыбкинской группы открыты в 2015-2018 гг. в восточной части Рубежинского прогиба, к западу от Соль-Илецкого свода (Оренбургская область; южная часть Волго-Уральской нефтегазоносной провинции) благодаря применению сейсморазведки 3D и поисково-разведочному бурению. Интервал их стратиграфического распространения охватывает доманиковский, речичкий и воронежский горизонты франского яруса. Рифы облекаются и перекрываются карбонатно-терригенно-глинистыми отложениями колганской свиты, формирующими флюидоупор. К рифогенным ловушкам приурочены нефтяные залежи высотой до 150 м. Развитие рифов происходило в условиях значительных изменений уровня моря, вызванных как эвстатическими колебаниями, так и региональной тектоникой. Приведены фактические данные о проявлениях поверхностного и подповерхностного карста в различных рифах группы. Выделены три эпохи развития карста – позднедоманиковская, позднеречичская и поздневоронежская. Изложены доказательства проявлений в рифовых массивах постфранского гидротермокарста. Коллекторы, сформированные в результате карстовых процессов, характеризуются высокой сложностью структуры пустотного пространства. На образцах различного размера для них установлен масштабный эффект фильтрационных свойств, который необходимо учитывать при оценке запасов углеводородов.

Ключевые слова: рифы, карст, гидротермокарст, фран, рифовые фации, карстовые коллекторы, Волго-Уральская нефтегазоносная провинция

Для цитирования: Вилесов А.П., Чертина К.Н. (2020). Палеокарст, гидротермокарст и карстовые коллекторы франских рифов Рыбкинской группы. *Георесурсы*, 22(2), с. 15-28. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.15-28>

Введение

По определению Г.А. Максимовича (1963): «карст – это процесс химического и отчасти механического воздействия подземных и поверхностных внерусловых вод на растворимые проницаемые горные породы». В результате карста в карстующемся массиве возникают разнообразные морфологические формы новообразованных пустот. Важную роль сыграл древний карст (или палеокарст) при формировании пород-коллекторов в карбонатных нефтегазоносных комплексах различного возраста. Одним из примеров указанного значения палеокарста являются продуктивные верхнефранские одиночные рифы Рыбкинской группы, расположенные в южной части Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (НГП), на территории Оренбургской области. В данной работе приводится новая информация по проявлениям карста в этих своеобразных природных резервуарах. Статья является логическим продолжением обзорной публикации о рыбкинской группе одиночных рифов (Вилесов и др., 2019а).

Следует отметить, что по девонским осадочным бассейнам Австралии и Канады, где распространены франские и фаменские рифы, опубликованы многочисленные фактические данные о проявлениях палеокарста (например: Chow & Wendte, 2011; Playford, 2002; George & Powell, 1997; и др.). В то же время, для территории Волго-Уральской НГП этот важный раздел геологии

рифов до настоящего времени остается, практически, белым пятном.

Первый одиночный франский риф Рыбкинской группы с высокоамплитудной нефтяной залежью (Западно-Рыбкинский) был случайно открыт в 1990 г. при поисково-разведочном бурении на терригенный девон. Целенаправленные поиски привели к открытию рядом еще одной постройки – Северо-Жоховского рифа, – также продуктивной (Никитин и др., 2011). Запасы открытых залежей были поставлены на баланс в составе Рыбкинского месторождения. По данным биостратиграфии установлено, что формирование построек произошло в речичко-воронежское время позднего франа. Рифы перекрываются позднефранско-раннефаменской карбонатно-терригенно-глинистой колганской толщей. В 2012-2013 гг. ПАО «Оренбургнефть» провело на территории Волостновского лицензионного участка, включающего в свой контур рифы Рыбкинского месторождения, сейсморазведочные работы 3D. В результате были открыты и подготовлены к бурению около 30 верхнефранских одиночных бассейновых рифов, аналогичных рыбкинским (Никитин и др., 2017, 2018). Высота рифов изменяется от 180 до 220 м, диаметр – от 0,6 до 1,5 км.

В 2015-2018 гг. проведено разбуривание органогенных построек. Нефтяные залежи открыты как в рифовых резервуарах, так и в надрифовых структурах облекания.

Материал

На Волостновском лицензионном участке (ЛУ) в настоящее время бурением вскрыто уже более 20-ти

* Ответственный автор: Александр Петрович Вилесов
E-mail: apvilesov@mail.ru

© 2020 Коллектив авторов

продуктивных верхнефранских одиночных рифов (включая рифы Рыбкинского месторождения) (рис. 1). В процессе бурения из рифовой части разреза отбирался керн диаметром 100 и 110 мм преимущественно хорошего качества. Керном рифы Волостновского ЛУ охарактеризованы неравномерно, т.к. отбор производился главным образом из верхней продуктивной части разреза, либо отдельными разобщенными интервалами. По отдельным рифам выполнен значительный отбор керна. В частности, непрерывный отбор керна на протяжении более 100 м выполнен на Новожиховском рифе (Шакиров и др., 2019). В общей сложности исследования керна рифовых фаций выполнены по 19 постройкам.

По результатам седиментологического анализа керна выполнена реконструкция истории формирования рифов Рыбкинской группы, определены фациальные зоны, выделены группы организмов-каркасостроителей и их распределение в пределах рифов, определены вторичные преобразования пород (Вилесов и др., 2019а). В процессе седиментологических исследований в разрезе рифов выделены разнопорядковые циклы, установлены горизонты субаэральных перерывов. История развития рыбкинских рифов была сопоставлена с кривой эвстатических колебаний, составленной коллективом специалистов Московского государственного университета для Русской плиты (Alekseev et al., 1996). Седиментологический анализ керна позволил выделить в развитии рифов три этапа, совпадающие с тремя этапами региональных колебаний уровня моря, – доманиковский, речичский и воронежский. В разрезах рифов установлено, что с завершением каждого этапа и периодами низкого положения уровня моря связаны эпохи палеокарста.

На положение уровня моря в позднем девоне на территории Оренбургской области оказывали существенное влияние тектонические движения Соль-Илецкого свода (Nikitin et al., 2013; Вилесов и др., 2019б).

Стратиграфическое и тектоническое положение Рыбкинской группы рифов

Интервал рыбкинских рифов соответствует доманиковому, речичскому и воронежскому горизонтам франского яруса верхнего девона (Вилесов и др., 2019а). В 2015 г. разрез рыбкинских рифов был выделен в рыбкинскую свиту (Фортунатова и др., 2015), а в 2017 г. рыбкинская свита введена в унифицированную субрегиональную стратиграфическую схему верхнедевонских отложений Волго-Уральского субрегиона (Унифицированная субрегиональная стратиграфическая схема..., 2018). Подстилается рыбкинская свита маломощными известняками саргаевской свиты, замещается по латерали и перекрыта карбонатно-терригенно-глинистыми отложениями колганской свиты. В состав колганской свиты входят и глинистые породы нижнего фамена, которые формируют флюидоупор над франскими отложениями, обрамляющие Соль-Илецкое поднятие.

В тектоническом плане район развития группы рыбкинских рифов расположен в зоне сочленения Рубежинского прогиба, Соль-Илецкого свода и Павловской седловины (Никитин и др., 2011). Органогенные постройки Рыбкинского месторождения совместно с Жоховским рифом расположены на девонской тектонической флекуре, ориентированной согласно седиментационному уступу позднефранской карбонатной платформы в северо-западной части Волостновского участка (рис. 1). Большинство

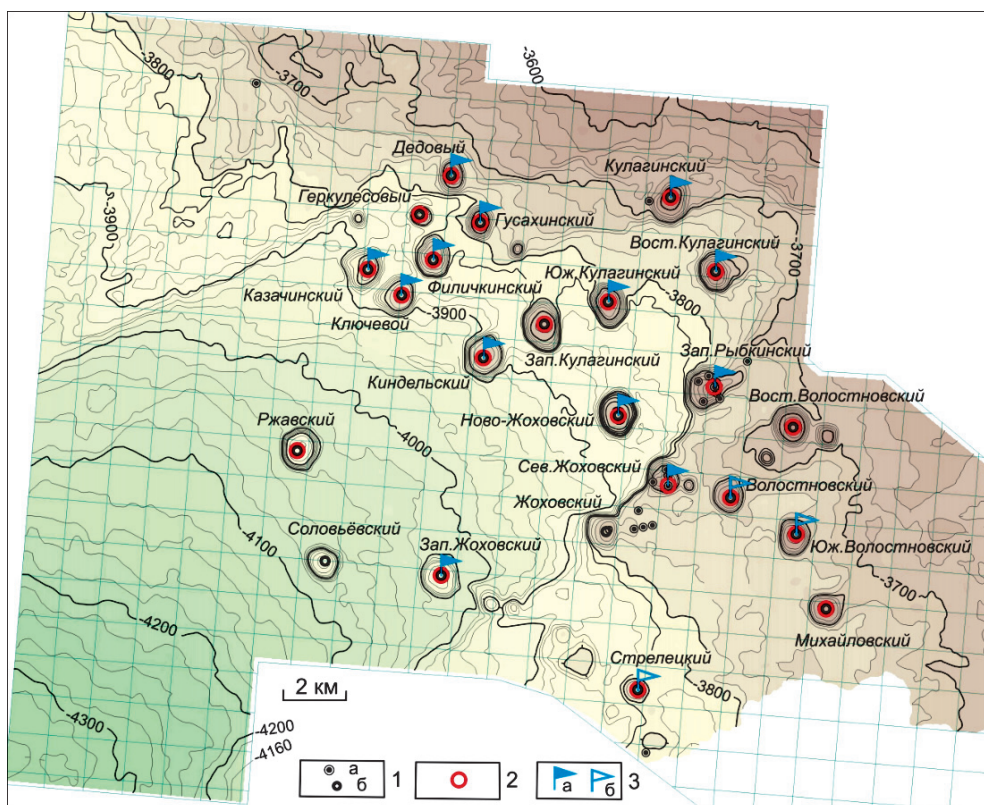


Рис. 1 Рыбкинская группа франских рифов: структурная карта по кровле воронежского горизонта (Никитин и др., 2017). 1а – старые скважины, 1б – скважины, пробуренные в 2015–2018 гг.; 2 – рифы, в разрезах которых по керну диагностирован поверхностный и подповерхностный карст; 3 – рифы, в которых по керну диагностирован гидротермокарст (а – интенсивный, б – слабый).

рифов, находящихся между обеими флексурами, образуют субпараллельные им линии. Возможно, что эти рифы также контролируются малоамплитудными тектоническими нарушениями.

Палеогеографическое положение Рыбкинской группы рифов

Район развития рыбкинских рифов в палеогеографическом плане приурочен к северо-восточной шельфовой окраине палеоконтинента Лавруссия (рис. 2). Как видно на палинспатической карте К. Скотиза (Scotese, 2014), этот участок континентального шельфа во франское время находился в приэкваториальной зоне северного полушария. Сходное палеогеографическое положение дают и другие палинспатические реконструкции (например: Оренбургский тектонический узел..., 2013; Golonka, 2002; и др.).

Для приэкваториальной климатической зоны характерны высокие температуры, обильные ливневые дожди, высокая влажность. Все эти факторы благоприятны для интенсивного развития карста в карбонатных толщах, выведенных в условия субаэральной экспозиции (Moog, 2001; Wilson, 2012).

Близкими возрастными аналогами рыбкинских рифов являются одиночные бассейновые рифы формации Leduk Западной Канады (Atchley et al., 2006; Switzer et al., 1994; и др.), которые также формировались в приэкваториальной зоне, только на западной шельфовой окраине Лавруссии.

Фаціальное строение рыбкинских рифов

В рыбкинских рифах по керну выделены фаціальные комплексы рифового ядра и рифового склона, а также зоны проявлений карста и гидротермокарста (Вилесов и др., 2019а). Проявления древнего карста (палеокарста) и гидротермокарста наложены на породы фаціальных комплексов рифового ядра и склона.

В фаціальном комплексе рифового ядра по литологическим признакам выделены фации: 1) гребневой зоны рифа; 2) загребневой зоны; 3) рифового мелководья; 4) надрифовой отмели; 5) внутририфовой лагуны. Для пород гребневой зоны характерны массивные, табулярные и комбинированные скелеты строматопороидей, образующие

прочный каркас, устойчивый к волновому воздействию. В известняках загребневой зоны наиболее типичны крупные строматопороидеи с грибовидным скелетом и обильными микробальными обрастаниями. В известняках фации рифового мелководья встречаются многочисленные толстоветвистые строматопороидеи, среди скелетов которых располагается обильный биокластовый материал. Породы надрифовой отмели представлены разнозернистыми биокластовыми известняками со структурой рудстоун и грейнстоун. Для фации внутририфовой лагуны характерны иловые известняки с биокластовым материалом.

Благодаря карстованию разновозрастные части рифового ядра соединены в единую гидродинамическую систему. Породы химически чистые; появление примесей (например, глинистых минералов, кварца) обусловлено их привнесением по системам карстовых пустот.

Фаціальный комплекс рифового склона подразделяется на две фации: верхняя часть рифового склона и нижняя часть рифового склона.

Фация верхней части рифового склона подразделяется на следующие субфации: 1) биогермы верхней части склона; 2) шлейфовые зернистые отложения верхней части склона; 3) карбонатные дебриты верхней части склона; 4) нептунические дайки.

Для биогермных пород верхней части склона характерны пластинчатые и листовидные формы каркасообразующих организмов – строматопороидей, кораллов, гидроидей.

Субфация шлейфовых зернистых отложений верхней части рифового склона представлена разнозернистыми известняками со структурой рудстоун, грейнстоун, пакстоун, флаутстоун. Зернистый материал разнообразный: литокласты, биокласты, кортоиды, пелоиды. Среди биокластов доминируют остатки иглокожих и толстоветвистых строматопороидей. Зернистые отложения шлейфа достигают максимальной протяженности и мощности в тыловой (подветренной) части рифов и могут составлять значительную часть рифового комплекса (Вилесов и др., 2019а).

Карбонатные дебриты верхней части склона представлены карбонатными брекчиями, конгломератами и дресвяниками с разнозернистым карбонатным матриксом.

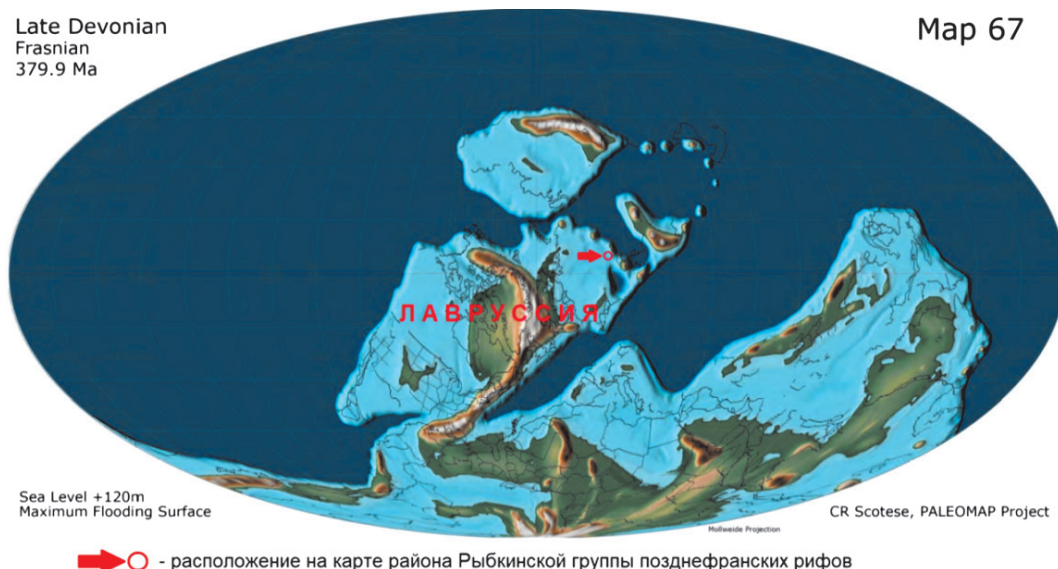


Рис. 2. Палеогеографическая карта франского времени девонского периода на палинспатической основе (Scotese, 2014)

Размер обломков изменяется от мелкого щебня до глыб в первые десятки сантиметров. Наиболее типичные структуры обломков – строматопоровый и коралловый баундстоун. Матрикс, вмещающий обломки, по структуре от разнотернистого вакстоуна до рудстоуна. Среди биокластов в матриксе преобладают фрагменты криноидей. В ряде случаев распределение обломков в дебритовом слое имеет градиционный характер – крупные внизу, мелкие вверху, – а контакт с подстилающим слоем имеет эрозионный характер.

Субфация нептунических даек верхней части рифового склона диагностирована в нескольких рифовых постройках. Видимая протяженность даек в керне достигает 1,5 м. Стенки даек сформированы коренными породами склона; относительно ровные, наклонные. Заполнение даек резко отличается по структуре от вмещающих коренных пород, подвергнутое разрыву: здесь выделяются разнотернистые известняки от пакстоунов до рудстоунов и известняковые разнообломочные брекчии. В ряде случаев в заполнении даек наблюдается отчетливая вертикальная зональность, которая проявляется в виде заметного укрупнения зерен сверху вниз или смене структуры с зернистой на брекчиевидную. Вдоль нептунических даек наблюдаются довольно значительные карстопроявления.

Как и фациальный комплекс рифового ядра, породы верхней части склона характеризуются химической чистотой.

Фацция нижней части рифового склона представлена разнообломочными глинистыми известняками в различной степени доломитистыми и доломитовыми, с неравномерной примесью нерастворимого осадка (глинистый материал, зерна кварца и полевых шпатов алевритовой и тонкой песчаной размерности, пирит). Глинистые известняки могут переходить в мергели с прослоями известковых аргиллитов. Преобладающая структура известняков – разнотернистый флаутстоун. Глинисто-карбонатный матрикс во флаутстоунах неравномерно доломитизирован; в него включены разнообразные литокласты известняков и биокласты.

Карст рыбкинских рифов

По основному агенту растворения в рифовых породах выделен карст метеорных вод и карст термальных вод (гидротермальный карст). В первом случае растворение карбонатных пород происходило за счет фильтрации в рифовые массивы атмосферных осадков. Во втором случае агрессивное воздействие на породы рифов оказывали горячие глубинные воды, обогащенные специфическим комплексом растворенных химических элементов.

По отношению к земной палеоповерхности карст, развивавшийся в результате воздействия метеорных вод, можно подразделить на *поверхностный* и *подповерхностный*. Поверхностный карст проявляется главным образом в кровле рифа, и его проявление фиксируется такими характерными морфологическими формами карстовых образований, как поноры и карры. Подповерхностный карст охватывает значительный интервал рифового разреза. Он формировался в зоне вертикальной фильтрации метеорных вод, а также вдоль поверхности зеркала пресных вод и ниже ее, вплоть до зоны смешения с морскими поровыми водами. Наиболее значительными морфологическими формами подповерхностного карста являются пещеры.

Поверхностный карст

Проявления поверхностного карста (рис. 3) приурочены к горизонтам субэвральным перерывов. В разрезе рыбкинских рифов выделены три таких уровня: 1) кровля доманиковского горизонта; 2) кровля речичского горизонта; 3) кровля воронежского горизонтов (табл. 1).

Наиболее полно керном представлены проявления поверхностного карста в кровле воронежского горизонта. Из этого стратиграфического интервала отобран керн по 12-ти рифам. Во всех случаях в керне наблюдается резкий литологический контакт: налегание на эродированные светло-серые известняки рифового комплекса серых и темно-серых глинистых алевропесчаников сублиторали (рис. 3а, б, д), в которых встречаются мелкие брахиоподы и их нотекстуры *Zoophycos*. В рифах западной части участка наблюдается смена алевропесчаников темно-серыми глинисто-алевритуристыми известняками со структурой биокластового флаутстоуна: в микрокристаллическом кальцитовом матриксе неравномерно распределены скелеты тонковетвистых ругоз и строматопороидей, брахиоподы, детрит иглокожих.

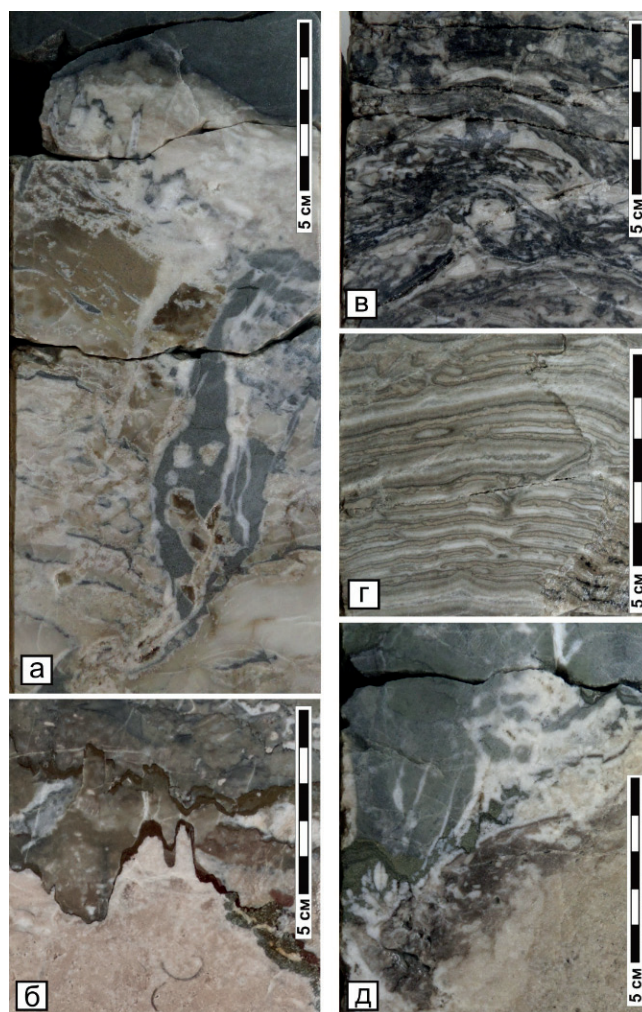


Рис. 3 Проявления поверхностного карста в рифах Волостновского участка: а – узкая воронкообразная понора в кровле воронежских рифовых известняков (Новожиховский риф); б – карры на поверхности рифовых известняков воронежского горизонта (Гусахинский риф); в – известняки позднеэврального палеогенового горизонта (Стрелецкий риф); г – микробинальные известняки зоны разгрузки карстовых вод (Стрелецкий риф); д – крупная воронкообразная понора в кровле воронежских рифовых известняков (Восточно-Кулагинский риф).

Риф	Кровля воронежского горизонта	Кровля речицкого горизонта	Кровля доманиковского горизонта
Рыбкинский	эрозионное налегание терригенных осадков на каркасный известняк	-	-
Новожиховский	карровые бороздки, поноры (заполнены глинистым алевроитово-песчаным материалом)	карровые трещины, выклинивающиеся вниз и заполненные глинистым доломитом	-
Волостновский	-	-	известняковая брекчия
Кулагинский	мелкие карровые борозды, корродированные стилолитами	доломитовая брекчия	-
Южно-Волостновский	пологие карровые борозды	-	-
Михайловский	грубообломочная известняковая брекчия	-	-
Южно-Кулагинский	мелкие карровые борозды, брекчированность	грубообломочная карбонатная брекчия	грубообломочная карбонатная брекчия
Восточно-Кулагинский	воронкообразная понора, переходящая вниз в крупную карстовую полость, выполненную доломитовой брекчией и песчанисто-алевритистым доломитом	-	-
Казачинский	эрозионное налегание терригенных осадков на каркасный известняк	-	-
Ключевой	мелкие карровые борозды, субвертикальные трещины с карбонатно-глинистым выполнением	мелкие карровые борозды	-
Ржавский	эрозионное налегание терригенных осадков на каркасный известняк	-	-
Западно-Жоховский	-	грубообломочная карбонатная брекчия	-
Гусахинский	глубокие (до 5 см) карры	-	-
Геркулесовый	мелкие карровые борозды	-	-
Стрелецкий	-	горизонт карбонатной палеопочвы с ризокрециями, микробяллы зоны разгрузки карстовых вод	-

Табл. 1. Проявления поверхностного карста и перерывов, зафиксированные по керну рифов Рыбкинской группы

Проявления поверхностного карста представлены *каррами* (борозды на поверхности рифовых известняков (рис. 3б)) и *понорами* – небольшими воронками или трубчатыми углублениями (рис. 3а, д). Поноры заполнены терригенно-глинистым материалом (рис. 3а). Вдоль их стенок может наблюдаться брекчиевидная отдельность коренной породы. Видимая ширина понор может достигать 5-6 см, глубина – 0,5-1,5 м.

Данные о зафиксированных по керну проявлениях поверхностного карста различных стратиграфических уровней и разных рифовых построек приведены в табл. 1.

Подповерхностный карст рыбкинских рифов

Подповерхностный карст диагностирован по керну в 22-х постройках. По имеющемуся материалу выделены разнообразные формы проявления подповерхностного карста для речицкого и воронежского интервалов разреза (табл. 2; рис. 4). В частности, в керне установлены такие характерные морфологические разновидности карстопоявлений, как пещеры, с которыми связаны системы мелких карстовых полостей и трещин. Образования подповерхностного карста расположены значительно ниже установленных поверхностей субаэральной экспозиции.

Карстовые пещеры характеризуются шириной, значительно превышающей диаметр керна и высотой от 0,1 до 4,0-7,5 м. Наиболее крупные палеокарстовые пещеры выделены по керну в разрезах Восточно-Волостновского,

Киндельского, Восточно-Кулагинского рифов (табл. 2). Эти пещеры заполнены песчанистым, алевроитисто-глинистым и глинистым доломитом, в котором встречаются брекчированные фрагменты коренных рифовых пород. Наблюдается закономерная приуроченность грубых угловатых обломков брекчий обрушения к нижней части пещер. Глинисто-терригенный материал на этапах снижения и низкого положения уровня моря в значительных объемах поступал в Рубежинский прогиб с Соль-Илецкой островной суши. На этапах повышения уровня моря происходило его перераспределение волновыми процессами и через системы вертикальных карстовых пустот он попадал в полости, сформированные подповерхностным карстом. Наиболее характерно повышенное содержание привнесенного терригенного и глинистого материала для выполнения поздневоронежских карстовых пустот.

Интервалы развития пещер выделяются методами ГИС по повышенным значениям гамма-каротажа (ГК).

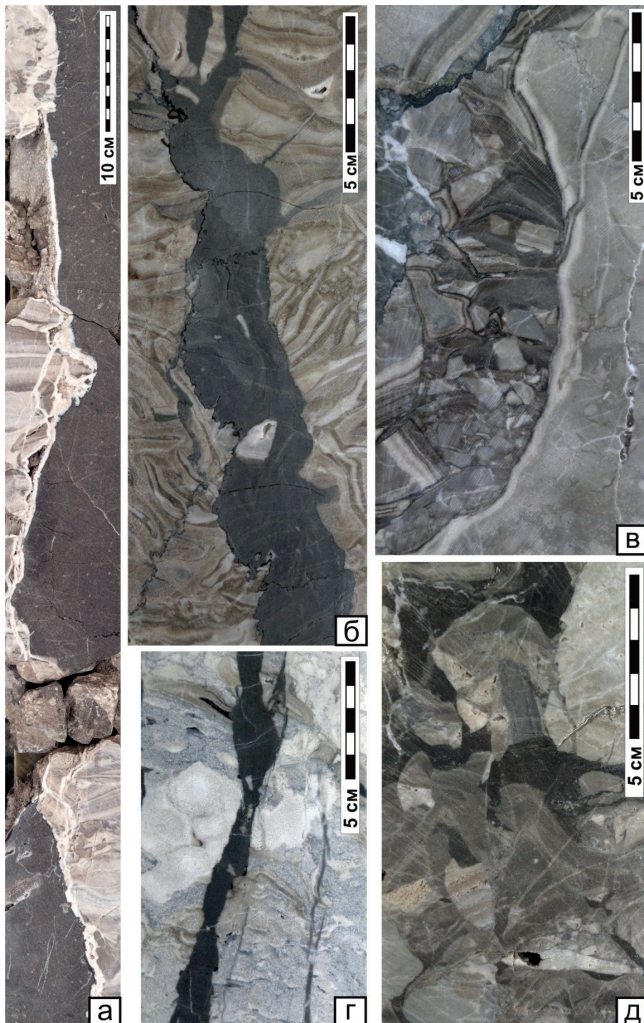
Карстовые полости могут достигать в ширину 5-10 см. Они довольно обычны по разрезу, имеют различную форму, как правило, сопровождаются трещинами. Нередко наблюдаются системы полостей, связанных трещинами. Полости могут быть выполнены глинистым доломитом, глинистым алевро-песчаником, карбонатным щебнем в глинисто-доломитовом и алевроитово-песчано-доломитовом матрице. Стенки полостей неровные, корродированные.

Риф	Воронежский горизонт	Речицкий горизонт	Доманиковский горизонт
Западно-Рыбкинский	карстовые трещины	-	-
Северо-Жоховский	карстовые трещины с системами мелких полостей, выполненные глинистым доломитом	-	-
Рыбкинский	наклонные карстовые трещины с системами каверн и мелких полостей, частично выполненных терригенно-глинистым материалом	-	-
Новожиховский	наклонные трещины различной ширины, системы трещин и разнообразных полостей, выполненные алевроитово-глинистым и карбонатно-глинистым материалом, карбонатным щебнем	мелкие карстовые полости, выполненные карбонатным щебнем в глинисто-карбонатном матриксе	-
Восточно-Волостновский	карстовая пещера в 17 м от поверхности; высота более 5 м; выполнение – доломитовый щебень и брекчия, алевроитово-глинисто-доломитовый материал	-	-
Волостновский	наклонные трещины различной ширины, выполненные алевроитово-глинистым и карбонатно-глинистым материалом	субвертикальные и наклонные трещины различной ширины, выполненные алевроитово-глинистым, глинисто-доломитовым материалом и карбонатным щебнем	наклонные извилистые трещины различной ширины, выполненные алевроитово-глинисто-доломитовым материалом
Кулагинский	разнообразные по ширине наклонные трещины с доломитовым, доломитово-глинистым заполнением, мелкие полости с глинистым выполнением, крупные субгоризонтальные полости высотой до 30-50 см со слоистым доломитовым заполнением и угловатыми карбонатными обломками	субгоризонтальные и наклонные полости высотой до 30 см с карбонатной брекчией в глинистом и доломитово-глинистом матриксе	-
Южно-Волостновский	Разнообразные субвертикальные и наклонные трещины, мелкие полости с песчано-алевритово-глинистым, доломитово-глинистым и кальцитовым выполнением; единичные субгоризонтальные полости с карбонатной брекчией	-	-
Михайловский	наклонные трещины с доломитово-глинистым и песчано-алевритово-глинистым заполнением; наклонные полости с глыбово-щебневым заполнением в доломитово-глинистом матриксе	пещеры высотой до 2 м, заполненные доломитовой брекчией; протяженные наклонные карстовые щелевидные полости по нептуническим дайкам с литокластово-щебневым выполнением	-
Западно-Кулагинский	вертикальные карстовые трещины, выполненные глинистым доломитом	-	-
Южно-Кулагинский	субвертикальные извилистые трещины с кристаллическим кальцитовым и доломитовым выполнением; субгоризонтальные и наклонные полости с доломитовыми брекчиями; единичные полости, выполненные ангидритом	-	-
Восточно-Кулагинский	карстовые пещеры высотой от 2,0 до 3,5 м (и более), выполненные разнообломочной доломитовой брекчией	пещера высотой до 0,5 м, заполнена доломитовой брекчией с доломитово-глинистым матриксом	-
Киндельский	система карстовых пещер высотой от 1 до 8 м, выполненных доломитовыми брекчиями, доломитовыми разнообломочными конгломератами, обломочными флаутстоунами и доломатстоунами	-	-

Табл. 2. Проявления подповерхностного карста, зафиксированные по керну рыбкинских рифов

Риф	Воронежский горизонт	Речицкий горизонт	Доманиковский горизонт
Казачинский	наклонные карстовые трещины с системами мелких полостей, выполненные доломитово-глинистым материалом	-	-
Ключевой	наклонные и субвертикальные трещины изменчивой ширины, выполненные разнокристаллическим доломитом	-	-
Ржавский	вертикальные карстовые трещины с системами мелких полостей	-	-
Филичкинский	редкие изометричные полости с глинисто-доломитовым выполнением	-	-
Западно-Жоховский	сложная система субвертикальных трещин и трещинных полостей	система многочисленных субвертикальных трещин, полостей и пещер (высотой от 0,5 до 1,5 м). Выполнение – глинистый и глинисто-доломитовый материал. В крупных полостях – брекчированные фрагменты коренной породы	-
Гусахинский	мелкие карстовые полости и трещины, выполненные карбонатным щебнем, доломитом и ангидритом	-	-
Дедовый	крупные карстовые полости, выполненные карбонатной брекчией и глинистым доломитом	система карстовых полостей, выполненных глинистым доломитом	-
Геркулесовый	мелкие карстовые полости с доломитово-глинистым выполнением	-	-
Стрелецкий	карстовые полости высотой до 12 см с глинисто-доломитовым выполнением	-	-

Табл. 2 (Продолжение). Проявления поверхностного карста, зафиксированные по керну рыбкинских рифов



На контактах с коренной породой часто развита крупнозубчатая и крупноамплитудная стилолитизация. Довольно обычны в разрезах щелевидные карстовые полости шириной от 2-5 мм до 3-6 см.

Карстовые трещины имеют изменчивую ширину и форму. Выполнены карбонатным щебнем, глинистым доломитом, глинистым алевропесчанником. Вдоль трещин часто развиты системы удлиненных каверн, карстовых полостей.

Специфичная группа карстовых трещин выделена в склоновой зоне рифов, сопряженная с системой субвертикальных нептунических даек. Такие трещины развивались вдоль контактов коренной породы и разномасштабного выполнения даек.

Карстовые зоны в пределах рифовых массивов формируют участки повышенной проницаемости, т.к. практически всегда пустоты даже с плотным выполнением сопровождаются системами раскрытых трещин и микротрещин. Нередко на карстовые системы трещин и полостей накладываются более поздние проявления

Рис. 4. Поверхностный карст в рифах Рыбкинской группы: а – пещера, выполненная темно-серым глинистым микрокристаллическим доломитом, по стенкам коренных каркасных известняков – жилы гидротермального доломита (Киндельский риф, воронежский горизонт); б – наклонная щелевидная карстовая полость в каркасном строматопоровом известняке, выполненная глинистым доломитом (Волостновский риф, речицкий горизонт); в – карстовая полость, выполненная карбонатным щебнем (Кулагинский риф, воронежский горизонт); г – щелевидные карстовые трещины с глинисто-доломитовым выполнением в склоновых биогермах (Западно-Жоховский риф); д – известняковая брекчия обрушения в карстовой полости (Киндельский риф, воронежский горизонт).

гидротермокарста (рис. 4а), значительно усложняя систему пустот и увеличивая ее емкость. При интенсивном проявлении гидротермальной доломитизации предшествующие ей проявления подповерхностного карста практически невозможно диагностировать.

Важным результатом проявлений подповерхностного карста является формирование зоны вторичных доломитов по модели смешения метеорных и морских поровых вод, что было установлено уже при изучении керна Западно-Рыбкинского и Северо-Жоховского рифов (Вилесов и др., 2013). Интервал вторичных разнокристаллических доломитов с повышенными фильтрационно-емкостными свойствами закономерно располагается в 60-70 м ниже кровли воронежской части рифов. Толщина доломитовой пачки изменяется от 10-12 до 15-18 м. Пустотное пространство в доломитах зоны смешения представлено многочисленными межкристаллическими порами, кавернами-молдами (по растворенным фоссилиям) и кавернами-вагами (каверны выщелачивания).

Гидротермальный карст рыбкинских рифов

Под гидротермальным карстом (или гидротермокарстом) понимается процесс выщелачивания горных пород нагретыми растворами с образованием и последующим заполнением полостей (Максимович, 1969; Дублянский, 1985; и др.). В карбонатных породах гидротермокарст может сопровождаться интенсивным доломитовым метасоматозом. Одна из моделей формирования вторичных доломитов так и называется – гидротермальная (Warren, 2000).

В рыбкинских рифах вторичные доломиты, сформированные в результате гидротермального карста, неравномерно распределены по разрезу и площади (табл. 3; рис. 1, 5). В отдельных рифах зафиксированы проявления гидротермального метасоматоза в интервалах непрерывной вертикальной протяженности более 30 м (например, в верхней части Южно-Кулагинского, Западно-Рыбкинского рифов). В других рифовых постройках признаки гидротермального воздействия встречаются частыми интервалами изменчивой мощности (от 1-2 до 6-12 м) по всему по разрезу. В третьей группе рифов гидротермокарст встречается редкими и небольшими участками, либо вообще не диагностирован по керну. Следует отметить, что по керну проявления гидротермокарста установлены только в воронежском и речичком интервалах разреза (табл. 3).

Породы, сформированные в результате гидротермального карста, представлены разнокристаллическими доломитами с характерными признаками: изогнутой (седловидной) формой кристаллов, зебровидной и пятнистой окраской, развитием кристаллических жил, сложных систем трещин с грубокристаллическими инкрустациями, неравномерным развитием рудопроявлений сульфида железа (прожилков, кристаллических жил, включений пирита). Первичная структура пород, подвергнутых гидротермальному метасоматозу, нередко практически не сохраняется.

Уверенно диагностируется гидротермальная природа вторичных доломитов по данным лабораторных геохимических исследований методом рентгенофлуоресцентного анализа: в грубокристаллических вторичных доломитах

рыбкинских рифов повышено содержание марганца и железа (рис. 6а, б), что характерно для доломитов гидротермальной модели (Warren, 2000). По сравнению со слабоизмененными известняками в доломитах понижено содержание стронция (рис. 6в).

Наиболее интенсивно гидротермокарст развивался по первично проницаемым породам закарстованных зон, поэтому вполне обычно наблюдать совмещение двух разных форм вторичных изменений. Особенно характерны проявления гидротермокарста в рифах, расположенных в пределах линейных зон. Например, в линейной зоне рифов Ключевой – Филичкинский – Гусахинский (рис. 1) гидротермокарст зафиксирован по керну всех скважин. Проявляется он в линейной зоне рифов Киндельский – Западно-Кулагинский – Южно-Кулагинский. В пределах отдельно стоящих

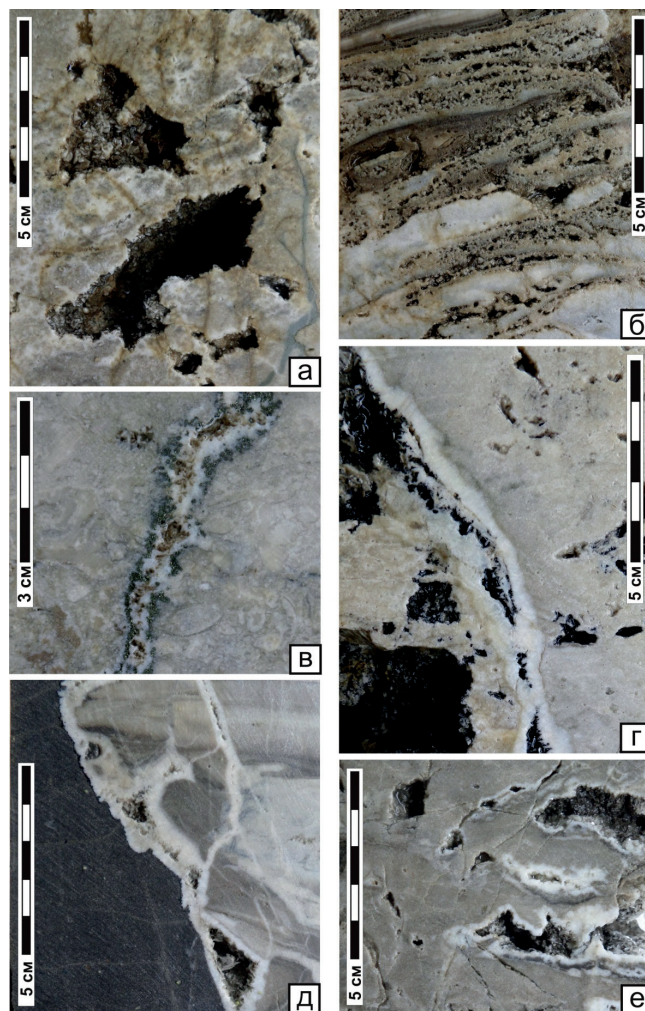


Рис. 5 Проявления гидротермокарста в Новожоховском (а, б, в), Южно-Кулагинском (г), Киндельском (д) и Западно-Жоховском (е) рифах: а – «зебровидные» крупнокристаллические вторичные доломиты с системой полостей, каверн и микротрещин; б – вторичный разнокристаллический гидротермальный доломит с реликтами скелетов строматопоройдей; в – кристаллическая доломитовая жила с цепочкой каверн и пиритовой оторочкой; г – вторичный доломит с крупными полостями и кавернами, с жилами белого грубокристаллического седловидного доломита; д – кристаллические жилы крупнокристаллического гидротермального доломита по стенкам карстовой полости; е – зебровидный гидротермальный доломит с системой полостей, каверн и трещин.

Риф	Воронежский горизонт	Речицкий горизонт
Западно-Рыбковский	грубокристаллические доломиты с седловидной формой кристаллов	-
Северо-Жоховский	пятнистые зоны доломитизации с крупными кристаллами доломита; протяженные наклонные трещины, инкрустированные седловидными кристаллами доломита и пиритом	-
Рыбковский	многочисленные наклонные трещины с инкрустациями грубокристаллического седловидного доломита	-
Новожоховский	неравномерно распределенные по разрезу пачки разнокристаллических доломитов толщиной от 1-2 до 5-6 м, форма кристаллов седловидная; в доломитах неравномерная пиритизация	частые пачки разнокристаллических доломитов толщиной от 0,5 до 3,0 м, форма кристаллов седловидная; неравномерная пиритизация, в том числе в виде кристаллических жил
Волостновский	редкие седловидные кристаллы доломита, инкрустирующие каверны	-
Кулагинский	кристаллические жилы седловидного доломита с пиритом	разнообразные кристаллические жилы седловидного доломита с пиритом; пачки вторичных разнокристаллических доломитов до 1,5 м толщиной
Южно-Волостновский	редкие седловидные кристаллы доломита, инкрустирующие каверны	-
Южно-Кулагинский	интенсивная доломитизация по разрезу, пачки разнокристаллических доломитов толщиной от 6 до 11 м; доломит седловидной формы формирует разнообразные кристаллические жилы, инкрустирует трещины; неравномерная пиритизация, в том числе в виде кристаллических жил	доломит седловидной формы встречается в виде кристаллических жил, инкрустирует трещины; вместе с ним встречается пирит
Восточно-Кулагинский	интенсивная доломитизация в верхней части рифа, пачки разнокристаллических доломитов толщиной до 4 м; доломит седловидной формы в виде разнообразных кристаллических жил, инкрустирует протяженные трещины; неравномерная пиритизация по доломитам	-
Киндельский	интенсивная доломитизация, пачки разнокристаллических доломитов толщиной от 2 до 8 м; седловидный доломит образует кристаллические жилы, инкрустирует протяженные трещины; по доломитам неравномерная пиритизация	-
Казачинский	белый грубокристаллический седловидный доломит формирует кристаллические жилы вдоль карстовых трещин	-
Ключевой	интенсивная доломитизация по разрезу в виде кристаллических жил седловидного доломита, инкрустаций по трещинам и кавернам; неравномерная пиритизация в том числе в виде пиритовых жил	-
Филичкинский	интенсивная доломитизация по разрезу, пачки разнокристаллических доломитов толщиной от 2 до 7 м; седловидный доломит формирует кристаллические жилы, встречается вместе с пиритом по протяженным трещинам	-
Западно-Жоховский	пачки разнокристаллических доломитов толщиной до 6 м; седловидный доломит формирует кристаллические жилы, вместе с пиритом инкрустирует разнонаправленные трещины	пачки разнокристаллических доломитов достигают в толщину до 1 м; седловидный доломит формирует кристаллические жилы, инкрустирует разнонаправленные трещины
Гусахинский	пачки разнокристаллических доломитов толщиной от 0,3 до 1,2 м; седловидный доломит формирует кристаллические жилы, инкрустирует трещины и каверны; по разрезу обычны жилы пиритового оруднения	-
Дедовый	интенсивная доломитизация по разрезу с пачками зебровидных доломитов; седловидный доломит образует протяженные извилистые кристаллические жилы, инкрустирует трещины	неравномерная доломитизация по разрезу; белый седловидный доломит образует извилистые кристаллические жилы
Стрелецкий	единичные трещины с инкрустациями грубокристаллического седловидного доломита и пирита	-

Табл. 3. Проявления гидротермокарста, зафиксированные по керну рифов Рыбковской группы

рифов, вне выраженных линейных зон, гидротермокарст не зафиксирован (например, в Михайловском и Геркулесовом рифах). В то же время, он очень интенсивно проявился в разрезе Ново-Жоховского рифа, который расположен в линейной зоне другого простирания:

Гусахинский – Западно-Кулагинский – Новоожоховский – Северо-Жоховский рифы (рис. 1).

Проявления гидротермального метасоматоза в известняках рифов Волостновского ЛУ произошло в постфранское время, значительно позднее этапа седиментации.

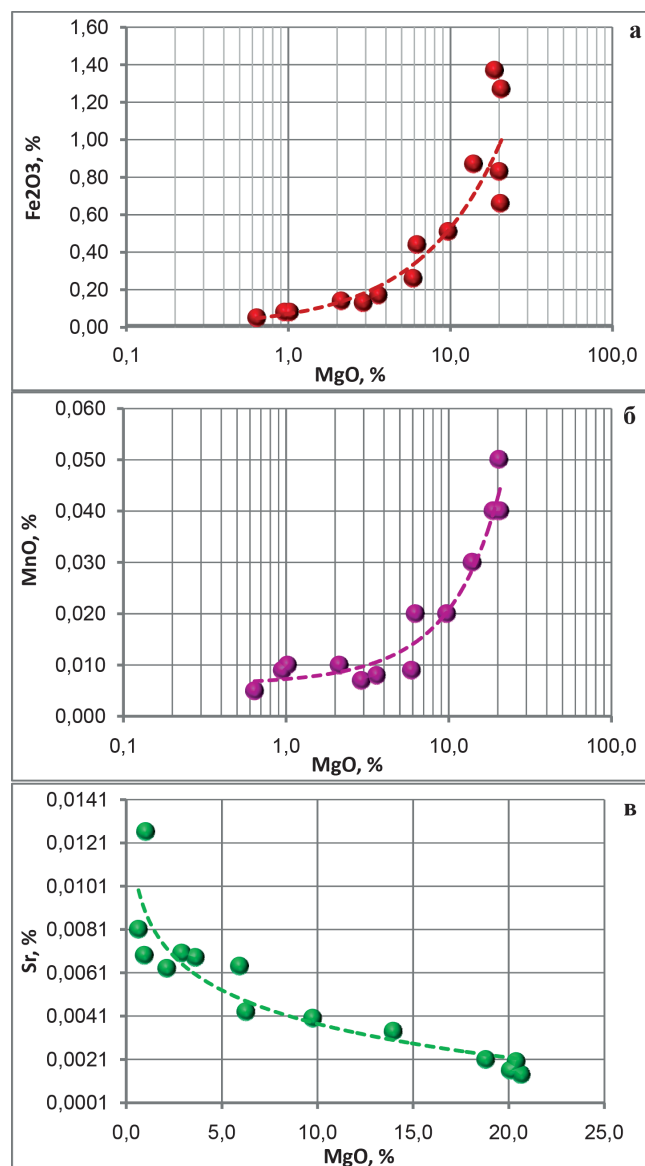


Рис. 6 Связь содержания отдельных химических элементов с интенсивностью гидротермальной доломитизации (на примере пород Западно-Жоховского рифа): а – железо; б – марганец; в – стронций

Замещение известняков вторичными доломитами было вызвано подъемом и фильтрацией в рифовые массивы горячих глубинных вод, обогащенных ионами магния и железа.

Для пород, подвергшихся гидротермальной проработке, характерно развитие системы наиболее разнообразных пустот – межкристаллических пор, каверн, трещин, полостей, – и, соответственно, наиболее сложная структура пустотного пространства. В отличие от палеокарстовых пустот, обычно заполненных продуктами разрушения коренных пород и привнесенным материалом (глинистым доломитом, глинистыми алевро-песчаниками и др.), гидротермальные пустоты в значительной степени остались полыми. Их стенки неравномерно инкрустированы грубокристаллическим доломитом, пиритом и более поздними по времени кристаллизации сульфатами. Однако полностью залеченные гидротермальные полости встречаются значительно реже, чем палеокарстовые.

Практически всегда породы, испытавшие гидротермальный метасоматоз, являются в разрезе сложными

высокопродуктивными трещинно-каверновыми и трещинно-каверново-поровыми коллекторами. Толщина пачек вторичных высокоемких доломитов в разрезе может достигать 15-30 м, а в отдельных случаях 50-60 м.

Эпохи карста в рыбкинских рифах

В истории формирования рыбкинских рифов можно выделить три эпохи проявлений поверхностного и подповерхностного карста (гипергенеза). Они связаны с периодами значительных падений уровня моря, обусловленными как эвстатическими колебаниями, так и влиянием инверсионных тектонических процессов в районе Соль-Илецкого свода.

Первая эпоха карста (позднедоманиковая). В конце доманикового времени в результате значительного снижения уровня моря (Alekseev et al., 1996), рыбкинские рифы подверглись карстованию. По керну на этом уровне установлены горизонты карбонатных брекчий. Позднедоманиковый карст проявился также в мозаичных карбонатных платформах, обрамляющих с севера Соль-Илецкую палеосушу (Вилесов и др., 20196).

Вторая эпоха карста (позднеречицкая) связана со значительным региональным снижением относительного уровня моря в конце речичского времени, обусловленным, главным образом, тектоническими процессами в зоне Соль-Илецкого свода (на фоне глобального эвстатического подъема). В рифовых постройках Рыбкинской группы формируется второй уровень карстовых проявлений с разнообразными карстовыми трещинами, полостями и пещерами. В Стрелецком рифе по керну установлена зона разгрузки карстовых вод с характерными туфовидными микробиалитами (рис. 3г).

Третий этап карстообразования (позднелворонежский) связан со значительным глобальным снижением уровня моря в конце воронежского времени (Alekseev et al., 1996; Johnson et al., 1985). В рифовых разрезах выделены многочисленные и разнообразные проявления позднелворонежского карста: карстовый рельеф рифовой поверхности с каррами и понорами, системы карстовых полостей и пещер с карстовыми брекчиями, карстовые трещины, зоны кавернозности. Для третьего этапа характерен интенсивный привнос терригенно-глинистого материала и его внедрение по карстовым пустотам в рифовые постройки. Важной особенностью третьего этапа было формирование в рифовых резервуарах зон вторичной доломитизации по модели смешения (Вилесов и др., 2013).

По масштабам карстопроявлений позднелворонежская и позднеречицкая эпохи сопоставимы между собой. Важным отличием является более значимое присутствие глинисто-терригенных примесей в выполнении карстовых пустот позднелворонежских карста.

После позднелворонежской эпохи карста рифообразование больше не возобновилось. На этапе евлановской трансгрессии рифы были перекрыты сублиторальными карбонатно-терригенно-глинистыми осадками. Глинисто-терригенный материал, поступающий с Соль-Илецкой суши, сыграл роль важного лимитирующего фактора для развития высокоорганизованных групп каркасостроителей. Возможно, что не менее важной причиной прекращения рифообразования был и позднелворонежский кризис в морских экосистемах (Correge, 2002).

Формирование проявлений гидротермального карста в рифах Рыбкинской группы приходится на постфранское время. Возможно, что оно связано с интенсивными блоковыми движениями Соль-Илецкого свода на рубеже франского и фаменского веков. Учитывая, что выше по разрезу, в известняках фамена и турне, проявлений гидротермокарста по керну не зафиксировано, этот временной рубеж гидротермальной активизации наиболее вероятен.

Карстовые коллекторы рыбкинских рифов

Таким образом, сложные карстовые коллекторы рыбкинских рифов сформировались в результате трех этапов гипергенеза и более позднего периода проявлений гидротермокарста. В периоды развития поверхностного и подповерхностного карста (гипергенеза) в результате фильтрации через карбонатные рифовые массивы атмосферных вод появились разнообразные новообразованные вторичные пустоты – каверны, трещины, полости и пещеры. Крупные палеокарстовые пустоты (пещеры и полости) оказались заполнены продуктами разрушения коренных пород рифов, а также привнесенными глинисто-терригенными осадками, поступавшими с Соль-Илецкой суши. Гидротермокарстовые процессы развивались в рифовых массивах унаследовано по системам карстовых проницаемых зон. В отличие от крупных карстовых пустот гидротермокарстовые полости лишь частично оказались выполнены новообразованными минералами.

Для карстовых коллекторов рыбкинских рифов характерна сложная структура пустотного пространства. Пустоты представлены всеми разновидностями – порами, кавернами, трещинами, полостями, пещеристыми полостями. Особенно наглядно высокую сложность пустотного пространства коллекторов можно наблюдать по изображениям, полученным методом рентгеновской компьютерной томографии на целой колонке керна (рис. 7).

На томографических срезах диагностируются системы ориентированных трещин (рис. 7а, з), отдельные полости, соединенные трещинами (рис. 7б, в, д), очаги интенсивной кавернозности (рис. 7г, ж), ориентированные системы каверновых каналов (рис. 7е), системы каверн, соединенных посредством пористой матрицы (рис. 7и). Из-за наличия крупных пустот и трещин керн из интервалов карстовых коллекторов, фактически, не поддается изучению стандартными методами в петрофизической лаборатории. Образцы стандартного размера (30 и 40 мм диаметром) могут быть изготовлены на участках пористых или умеренно кавернозных пород, но они не характеризуют коллектор с протяженными проводящими трещинами или системой крупных каверн и полостей. Переход на изучение фильтрационно-емкостных свойств карстовых коллекторов методом полноразмерных образцов (диаметром 100 мм) в какой-то мере позволяет решить эту проблему, т.к. в исследования оказываются вовлечены системы пустот более крупного размера.

При совместном изучении фильтрационных свойств сложных коллекторов рыбкинских рифов на стандартных и полноразмерных образцах отчетливо проявляется так называемый «масштабный эффект» – заметное различие стандартных и полноразмерных образцов по проницаемости. В России это направление лабораторных петрофизических исследований карбонатных коллекторов стало активно

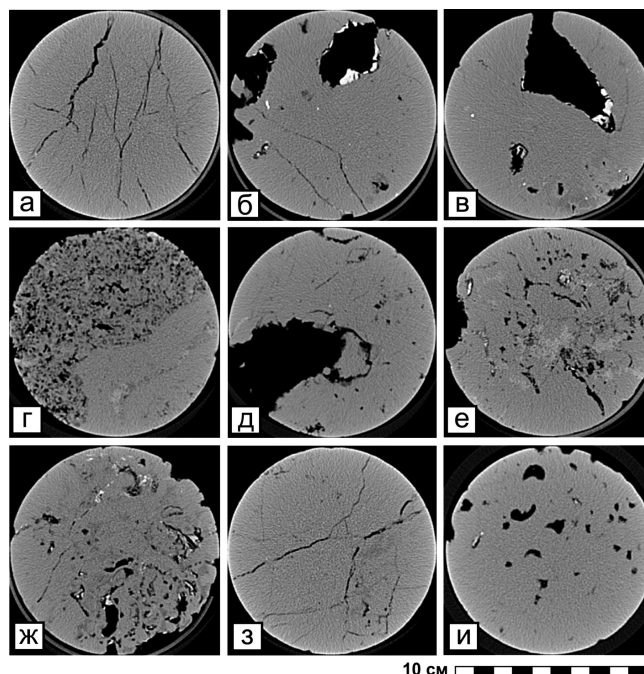


Рис. 7. Визуализированные изображения пустотного пространства карстовых коллекторов рифов Рыбкинской группы, полученные на колонке керна методом рентгеновской компьютерной томографии: а-в – Киндельский риф, г-д – Новожиховский риф, е-ж – Южно-Кулагинский риф, з – Южно-Волостновский риф, и – Западно-Кулагинский риф. Темное – пустоты, светлое – плотные участки породы. Оператор томографа – Кузнецов Е.Г. (Центр исследований керна Тюменского нефтяного научного центра).

развиваться при переходе к изучению керна диаметром 100 и более миллиметров, отобранного с применением новейших керноберегающих технологий (Михайлов, Гурбатова, 2011; Гурбатова и др., 2011; Гурбатова, Михайлов, 2011). Полноразмерные образцы керна позволяют охарактеризовать не только поровые фильтрующие каналы (доступные для изучения на стандартных образцах), но и фильтрующие пустоты большего размера (трещины, системы каверновых каналов). В итоге, при сходных значениях пористости проницаемость полноразмерных образцов может быть на один-два порядка выше, чем у стандартных образцов (рис. 8). Учет «масштабного эффекта» при работе со сложными рифовыми коллекторами позволяет корректнее оценить запасы (Немирович и др., 2016; Шакиров и др., 2019).

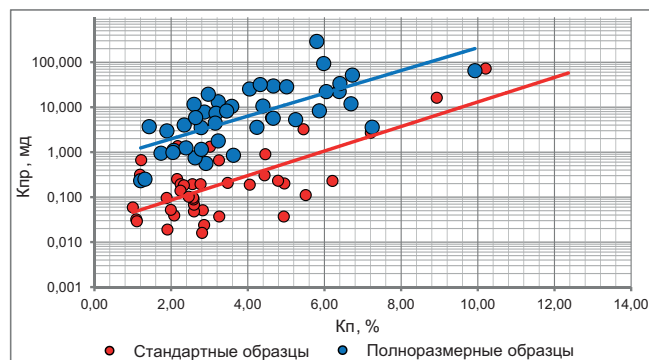


Рис. 8. Соотношение зависимости проницаемости ($K_{пр}$) и пористости (K_p) для образцов различного размера (по результатам лабораторных петрофизических исследований закарстованных пород Южно-Кулагинского рифа).

Однако наиболее точные фильтрационные характеристики карстовых коллекторов можно получить лишь при анализе гидродинамических исследований скважин. Дебиты нефти, полученные при испытании закарстованных интервалов рыбкинских рифов (от 190 до 380 м³/сут) (Вилесов и др., 2019а), свидетельствуют о значительной роли в фильтрации флюидов каверновых каналов и трещин с высокой проницаемостью. Привлечение результатов лабораторных петрофизических исследований, полученных только на образцах стандартного размера, не позволяют объяснить такие приточные особенности коллекторов.

Заключение

В результате лабораторных седиментологических исследований керн в франских одиночных рифах Рыбкинской группы установлены разнообразные проявления поверхностного и подповерхностного палеокарста, а также гидротермального карста.

В истории формирования рыбкинских рифов выделены три эпохи палеокарста – позднеманиковская, позднеречицкая и поздневоронежская. Каждая эпоха охарактеризована проявлениями поверхностного и подповерхностного карста.

В кровле доманика к проявлениям поверхностного карста отнесены карбонатные брекчии. Карстование на этом уровне было вызвано снижением уровня моря.

Позднеречицкая карстовая эпоха обусловлена значительными инверсионными тектоническими процессами в районе Соль-Илецкого свода и прилегающих к нему блоков на фоне глобального повышения уровня моря. Проявления поверхностного карста представлены известняковыми брекчиями и каррами, подповерхностного – пещерами, трещинами и полостями. Карстовые пустоты выполнены преимущественно карбонатным и глинисто-карбонатным материалом. Поздневоронежские процессы карстования вызваны значительным эвстатическим снижением уровня моря и положительными движениями блоков Соль-Илецкого свода. Проявления поверхностного карста представлены понорами, каррами и карбонатными брекчиями. В результате подповерхностного карста сформировались такие формы, как пещеры, трещины, полости. Выполнение карстовых пустот на этом стратиграфическом уровне наиболее разнообразно по вещественному составу; оно представлено карбонатными брекчиями, терригенно-глинистым и глинисто-карбонатным материалом.

Этапы позднеречицкого и поздневоронежского карста сопоставимы по своей масштабности. Для каждого из этих двух временных рубежей характерны значительные проявления подповерхностного карста.

Гидротермальному карсту рыбкинские рифы подверглись, возможно, на рубеже позднего франа – раннего фамена. В заметной степени гидротермокарст развивался по проницаемым зонам, сформированным ранее подповерхностным карстом. Важным результатом гидротермокарста является формирование вторичных высокоемких гидротермальных доломитов.

Проявления гидротермокарста распространены по площади неравномерно; наиболее интенсивно они развиты вдоль определенных линейных зон, связанных, вероятно, с малоамплитудными разломами.

Породы-коллекторы в теле рыбкинских рифов сформировались в результате сложной эпидиagenетической истории, в которой процессам палеокарста (гипергенеза) и гидротермокарста принадлежит ведущая роль.

Для карстовых коллекторов рыбкинских рифов характерна сложная структура пустотного пространства. Пустоты в них представлены всеми морфологическими разновидностями – порами, кавернами, трещинами, полостями, пещеристыми полостями.

Благодарности

Авторы признательны руководству и геологической службе ПАО «Оренбургнефть» за планомерный отбор качественного kernового материала из одиночных франских рифов и возможность его лабораторных исследований.

Отдельно хотелось бы поблагодарить рецензента профессора В.А. Жемчугову за тщательный анализ рукописи и ценные замечания к первичному варианту работы, которые способствовали заметному повышению качества публикации.

Литература

- Вилесов А.П., Немирович Т.Г., Лашманова А.А. (2013). Франские одиночные рифы Оренбургской области и перспективы их нефтегазности. *Мат. VII Всеросс. литологического сов.: Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории*. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, т. 1, с. 158-163.
- Вилесов А.П., Никитин Ю.И., Ахтямова И.Р., Широковских О.А. (2019). Франские рифы рыбкинской группы: фациальное строение, этапы формирования, нефтеносность. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 7, с. 4-22. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-7\(331\)-4-22](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-7(331)-4-22)
- Вилесов А.П., Никитин Ю.И., Рихтер О.В., Махмудова Р.Х. (2019). Модель седиментации колганской толщи верхнего девона северного обрамления Соль-Илецкого свода. *Сб. тр.: Эколит – 2019. Фациальный анализ в литологии: теория и практика*. М.: МГУ, с. 31-34.
- Гурбатова И.П., Кузьмин В.А., Михайлов Н.Н. (2011). Влияние структуры порового пространства на масштабный эффект при изучении фильтрационно-емкостных свойств сложнопостроенных карбонатных коллекторов. *Геология нефти и газа*, 2, с. 74-82.
- Гурбатова И.П., Михайлов Н.Н. (2011). Масштабные и анизотропные эффекты при экспериментальном определении физических свойств сложнопостроенных коллекторов. *Каротажник*, 7(205), с. 138-145.
- Дублянский Ю.В. (1985). Гидротермокарст как рудоподготовительный процесс. Новосибирск: Институт геологии и геофизики АН СССР, 18 с.
- Максимович Г.А. (1963). Основы карстоведения. Том 1: Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское книжное издательство. 443 с.
- Михайлов Н.Н., Гурбатова И.П. (2011). Масштабный эффект при лабораторном определении фильтрационно-емкостных свойств сложнопостроенных карбонатных коллекторов. *Технологии нефти и газа*, 4, с. 32-36.
- Немирович Т.Г., Серкин М.Ф., Вилесов А.П. (2016) Вторичная пустотность карбонатных отложений и ее роль в анизотропии проницаемости горных пород. *Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»*, 3, с. 38-43.
- Никитин Ю.И., Остапенко С.В., Щеглов В.Б. (2011). Новое направление геолого-разведочных работ в Оренбургской области. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 11, с. 13-18.
- Никитин Ю.И., Астафьев Е.В., Ахтямова И.Р., Шакирова Г.В., Широковских О.А. (2017). Поиск и изучение зон нефтенакопления, контролируемых рифами, на основе применения комплекса региональных критериев. *Нефтяное хозяйство*, 9, с. 64-69. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-9-64-69>
- Никитин Ю.И., Вилесов А.П., Корягин Н.Н. (2018). Нефтеносные верхнефранские рифы – новое направление геолого-разведочных работ в Оренбургской области. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 5, с. 4-11. <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2018-5-4-11>
- Никитин Ю.И., Вилесов А.П., Чикина Н.Н. (2015). Позднефранские одиночные рифы юга Оренбургской области. *Мат. Всеросс.*

литологического сов.: Геология рифов. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, с. 112-113.

Оренбургский тектонический узел: геологическое строение и нефтегазоносность. (2013). Ред. Волож Ю.А., Парасыны В.С. М.: Научный мир, 264 с.

Пучков В.Н. (2000). Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 146 с.

Тихомиров С.В. (1985). Этапы осадконакопления девона Русской платформы и общие вопросы строения и развития стратисферы. М.: Недра. 445 с.

Унифицированная субрегиональная стратиграфическая схема верхнедевонских отложений Волго-Уральского субрегиона. Объяснительная записка. Н.К. Фортунатова, Е.Л. Зайцева, М.А. Бушуева и др. (2018). М.: ВНИГНИ, 64 с.

Фортунатова Н.К., Зайцева Е.Л., Бушуева М.А., Швец-Тэнэга-Гурий А.Г., Баранова А.В., Кононова Л.И., Рахимова Е.В., Михеева А.И., Оленева Н.В., Мушин И.А. (2015). Верхний девон Волго-Уральского субрегиона: материалы по актуализации стратиграфических схем. М.: ВНИГНИ, 174 с.

Шакиров В.А., Вилесов А.П., Чертина К.Н., Истомина Н.М., Корягин Н.Н. (2019). Распределение запасов нефти в сложно построенных трещинных коллекторах франских рифов Волоостновского участка Оренбургской области. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 5, с. 13-21. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5\(329\)-13-21](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5(329)-13-21)

Alekseev A.S., Kononova L.I., Nikishin A.M. (1996). The Devonian and Carboniferous of the Moscow Syncline (Russian Platform): stratigraphy and sea-level changes. *Tectonophysics*, 268(1-4), pp. 149-168. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00229-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00229-6)

Atchley S.C., West L.W., Sluggett J.R. (2006). Reserves growth in a mature oil field: The Devonian Leduc Formation at Innisfail field, south-central Alberta, Canada. *AAPG Bulletin*, 90(8), pp. 1153-1169. <https://doi.org/10.1306/03030605193>

Chow N., Wendte J. (2011). Palaeosols and palaeokarst beneath subaerial unconformities in an Upper Devonian isolated reef complex (Judy Creek), Swan Hills Formation, west-central Alberta, Canada. *Sedimentology*, 58(4), pp. 960-993. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2010.01191.x>

Copper P. (2002). Reef development at the Frasnian/Famennian mass extinction boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 181, pp. 27-65. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(01\)00472-2](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(01)00472-2)

George A.D., Powell C.McA. (1997). Paleokarst in an upper devonian reef complex of the Canning basin, Western Australia. *Journal of sedimentary research*, 67(5), pp. 935-944. <https://doi.org/10.1306/D4268680-2B26-11D7-8648000102C1865D>

Golonka J. (2002). Plate-tectonic maps of the Phanerozoic. Phanerozoic reef patterns (eds. Kiessling W., Flugel E., Golonka J.). *SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication*, 72, pp. 21-75. <https://doi.org/10.2110/pec.02.72.0021>

Hunt, D.W., Fitchen, W.M., Kosa, E. (2002). Syndepositional deformation of the Permian capitan reef carbonate platform, Guadalupe Mountains,

New Mexico, USA. *Sediment. Geol.*, 154, pp. 89-126. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(02\)00104-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00104-5)

Johnson, J.G., Klapper, G., Sandberg, C.A. (1985). Devonian eustatic fluctuations in Euramerica. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 96, pp. 567-587. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96<567:DEFIE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<567:DEFIE>2.0.CO;2)

Moor C. (2001). Carbonate Reservoirs: Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. *Developments in Sedimentology*, 55, pp. 1-444.

Nikitin Yu.I., Rikhter O.V., Makhmudova R.K., Vilesov A.P. (2013). Late Devonian Geodynamic and Paleogeographic Conditions for Oil Traps Formation in the Volga-Ural Province, Russia. *75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013*. London, UK. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131043>

Nolting A., Zahm C.K., Kerans C., Nikolainkou M.A. (2018). Effect of carbonate platform morphology on syndepositional deformation: Insights from numerical modeling. *Journal of Structural Geology*, 115, pp. 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.07.003>

Playford P.E. (2002). Palaeokarst, pseudokarst, and sequence stratigraphy in Devonian reef complexes of the Canning Basin, Western Australia. *Proceedings of the Western Australian Basins Symposium*, pp. 763-793.

Scotese C.R. (2014). Atlas of Devonian Paleogeographic Maps, PALEOMAP Atlas for ArcGIS, volume 4, The Late Paleozoic, Maps 65-72, Mollweide Projection, PALEOMAP Project, Evanston, IL.

Switzer S.B., Holland W.G., Christie D.S., Graf G.C., Hedinger A.S., McAuley R.J., Wierzbicki R.A., Packard J.J. (1994). Devonian Woodbend-Winterburn Strata of the Western Canada Sedimentary Basin. *The Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin* (compilers: Mossop G. and Shetsen I.). Calgary, pp. 165-202.

Warren J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52, pp. 1-81. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2)

Wilson M.E.J. (2012). Equatorial carbonates: an earth systems approach. *Sedimentology*, 59(1), pp. 1-31. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2011.01293.x>

Сведения об авторах

Александр Петрович Вилесов – канд. геол.-мин. наук, доцент, эксперт по литологии и седиментологии ООО «Тюменский нефтяной научный центр» Россия, 625048, Тюмень, ул. М.Горького, 42 E-mail: apvilesov@mail.ru

Ксения Николаевна Чертина – заведующая лабораторией петрографических исследований ООО «Тюменский нефтяной научный центр» Россия, 625048, Тюмень, ул. М.Горького, 42

Статья поступила в редакцию 19.09.2019;
Принята к публикации 20.04.2020; Опубликована 30.06.2020

IN ENGLISH

Paleokarst, hydrothermal karst and karst reservoirs of the Franian reefs of the Rybkinsky group

A.P. Vilesov*, K.N. Chertina

Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russian Federation

*Corresponding author: Aleksandr P. Vilesov, e-mail: apvilesov@mail.ru

Abstract. More than 20 isolated reefs of the Rybkinsky group were discovered in 2015-2018 in the eastern part of the Rubezhinsky Trough, west of the Sol-Iletsky Arch (Orenburg region; southern part of Volga-Ural Oil and Gas Province), thanks to the use of seismic surveys 3D and exploration drilling. The interval of the stratigraphic distribution of the reefs encompasses Domanikian, Rechitskian and Voronezhian Horizons (=Regional Stages) of the Franian Stage of Upper Devonian. The reefs are cased and overlapped by carbonate-terrigenous-clay deposits of the Kolganian Formation that form the seal. High-amplitude oil fields (up to 150 m high) are related to the bodies of reefs. Reefs developed under conditions of significant changes in sea level caused by both eustatic fluctuations and regional tectonics.

Actual data on features of surface and deep karst in different reefs of the Rybkinsky group are given. Three karst epochs are allocated: 1) late Domanikian; 2) late Rechitskian; 3) late Voronezhian. Evidences of the post-franian hydrothermal karst in the reefs are presented. Reservoirs formed as a result of karst are characterized by high complexity of pore space.

Reef reservoirs have a scale permeability effect that is necessary to consider in hydrocarbon reserve calculations.

Keywords: reefs, karst, hydrothermal karst, Franian, reef facies, karst reservoirs, Volga-Ural oil and gas province

Recommended citation: Vilesov A.P., Chertina K.N. (2020). Paleokarst, hydrothermal karst and karstic reservoirs of the Franian reefs of the Rybkinsky group. *Georesursy = Georesources*, 22(2), pp. 15-28. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.15-28>

References

- Alekseev A.S., Kononova L.I., Nikishin A.M. (1996). The Devonian and Carboniferous of the Moscow Syncline (Russian Platform): stratigraphy and sea-level changes. *Tectonophysics*, 268(1-4), pp. 149-168. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00229-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00229-6)
- Atchley S.C., West L.W., Sluggett J.R. (2006). Reserves growth in a mature oil field: The Devonian Leduc Formation at Innisfail field, south-central Alberta, Canada. *AAPG Bulletin*, 90(8), pp. 1153-1169. <https://doi.org/10.1306/03030605193>
- Chow N., Wendte J. (2011). Palaeosols and palaeokarst beneath subaerial unconformities in an Upper Devonian isolated reef complex (Judy Creek), Swan Hills Formation, west-central Alberta, Canada. *Sedimentology*, 58(4), pp. 960-993. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2010.01191.x>
- Copper P. (2002). Reef development at the Frasnian/Famennian mass extinction boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 181, pp. 27-65. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(01\)00472-2](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(01)00472-2)
- Dublyanskiy Ju.V. (1985). Hydrothermal karst as process of the ore conditioning. Novosibirsk: Institut geologii i geofiziki AN SSSR. Preprint. 18 p. (In Russ.)
- Fortunatova N.K., Zaytseva E.L., Bushueva M.A., Shvets-Teneta-Guriy A.G., Baranova A.V., Kononova L.I., Rakhimova E.V., Mikheeva A.I., Oleneva N.V., Mushin I.A. (2015). Verkhniy devon Volgo-Uralskogo subregiona: materialy po aktualizatsii stratigraficheskikh skhem (Upper Devonian of the Volga-Ural subregion: materials on updating stratigraphy schemes). Moscow: VNIGNI, 174 p. (In Russ.)
- George A.D., Powell C.McA. (1997). Paleokarst in an upper devonian reef complex of the Canning basin, Western Australia. *Journal of sedimentary research*, 67(5), pp. 935-944. <https://doi.org/10.1306/D4268680-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Golonka J. (2002). Plate-tectonic maps of the Phanerozoic. Phanerozoic reef patterns (eds. Kiessling W., Flugel E., Golonka J.). *SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication*, 72, pp. 21-75. <https://doi.org/10.2110/pec.02.72.0021>
- Gurbatova I.P., Kuzmin V.A., Mikhailov N.N. (2011). Influence of pore space structure on the scale effect in studying permeability storage capacity of complicatedly built carbonate reservoirs. *Geologiya Nefti i Gaza = Russian Oil and Gas Geology*, 2, pp. 74-81. (In Russ.)
- Gurbatova I.P., Mikhailov N.N. (2011). Scale and anisotropic effects in experimental determination of physical properties of complex reservoirs. *Karotazhnik*, 7(205), pp 138-145. (In Russ.)
- Hunt, D.W., Fitchen, W.M., Kosa, E. (2002). Syndepositional deformation of the Permian capitan reef carbonate platform, Guadalupe Mountains, New Mexico, USA. *Sediment. Geol.*, 154, pp. 89-126. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(02\)00104-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00104-5)
- Johnson, J.G., Klapper, G., Sandberg, C.A. (1985). Devonian eustatic fluctuations in Euramerica. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 96, pp. 567-587. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96<567:DEFIE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<567:DEFIE>2.0.CO;2)
- Maximovich G.A. (1963). The basics of karst science. Vol. 1: *Questions of karst morphology, speleology and hydrogeology of karst*. Perm, 443 p. (In Russ.)
- Mikhailov N.N., Gurbatova I.P. (2011). Scale Effect at Laboratory Determination of Permeability and Porosity Properties of Complex Structured Carbonate Reservoirs. *Tekhnologii nefti i gaza = Oil and Gas Technologies*, 4, pp. 32-36. (In Russ.)
- Moor C. (2001). Carbonate Reservoirs: Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. *Developments in Sedimentology*, 55, pp. 1-444.
- Nemirovich T.G., Serkin M.F., Vilesov A.P. (2016). Secondary voidage of carbonate formations and its role in anisotropy of rock permeability. *Nauch.-tekh. vestnik OAO NK «Rosneft»*, 44, pp. 38-43. (In Russ.)
- Nikitin Yu.I., Rikhter O.V., Makhmudova R.K., Vilesov A.P. (2013). Late Devonian Geodynamic and Paleogeographic Conditions for Oil Traps Formation in the Volga-Ural Province, Russia. *75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013*. London, UK. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131043>
- Nikitin Yu. I., Ostapenko S.V., Scheglov V.B. (2011). New branch of activities pertaining to geological prospecting in Orenburg region. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdeniy = Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 11, pp. 13-18. (In Russ.)
- Nikitin Yu.I., Astafyev E.V., Akhtyamova I.R., Shakirova G.V., Shirokovskikh O.A. (2017). Exploration and research of oil and gas bearing zones controlled by reef using the regional criteria. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*, 9, pp. 64-69. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-9-64-69>
- Nikitin Yu.I., Vilesov A.P., Koryagin N.N. (2018). Oil-bearing upper-frasnian reefs – a new direction of geological exploration in orenburg region. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdeniy = Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 5, pp. 4-11. (In Russ.) <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2018-5-4-11>
- Nikitin Yu.I., Vilesov A.P., Chikina N.N. (2015). Late franian single reefs of the southern Orenburg region. *Proc. AllRuss. litologic. meet.: Geology of reefs*. Syktyvkar: IG Komi NTs UrO RAN, pp. 112-113. (In Russ.)
- Nolting A., Zahm C.K., Kerans C. Nikolinkou M.A. (2018). Effect of carbonate platform morphology on syndepositional deformation: Insights from numerical modeling. *Journal of Structural Geology*, 115, pp. 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.07.003>
- Orenburg tectonic junction: geological structure and petroleum potential. (2013). Ed. Volozh Yu.A and Parasyina V.S. Moscow, 264 p. (In Russ.)
- Playford P.E. (2002). Palaeokarst, pseudokarst, and sequence stratigraphy in Devonian reef complexes of the Canning Basin, Western Australia. *Proceedings of the Western Australian Basins Symposium*, pp. 763-793.
- Puchkov V.N. (2000). Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals. Ufa: Dauria, 146 p. (In Russ.)
- Tikhomirov, S.V. (1985). Stages of Sedimentation of the Russian Platform Devonian and general questions of the structure and development of the stratisphera. Moscow: Nedra, 268 p. (In Russ.)
- Unified subregional stratigraphic scheme of the Upper Devonian of the Volga-Ural subregion. (2018). Explanatory note. Fortunatova N.K., Zaytseva E.L., Bushueva M.A. et al. Moscow: VNIGNI, 64 p. (In Russ.)
- Scotese C.R. (2014). Atlas of Devonian Paleogeographic Maps, PALEOMAP Atlas for ArcGIS, volume 4, The Late Paleozoic, Maps 65-72, Mollweide Projection, PALEOMAP Project, Evanston, IL.
- Shakirov V.A., Vilesov A.P., Chertina K.N., Istomina N.M., Koryagin N.N. (2019). Oil reserves distribution in complicatedly-built fractured collectors of the franian reefs of Volostnovsky area in Orenburg region. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdeniy = Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 5, pp. 12-21. (In Russ.) [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5\(329\)-13-21](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5(329)-13-21)
- Switzer S.B., Holland W.G., Christie D.S., Graf G.C., Hedinger A.S., McAuley R.J., Wierzbicki R.A., Packard J.J. (1994). Devonian Woodbend-Winterburn Strata of the Western Canada Sedimentary Basin. *The Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin* (compilers: Mossop G. and Shetsen I.). Calgary, pp. 165-202.
- Vilesov A.P., Nemirovich T.G., Lashmanova A.A. (2013). Franian single reefs of the Orenburg region and its hydrocarbon potential. *Proc. VII AllRuss. litologic. meet.: Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentation processes in geological history*. Novosibirsk: INGG SO RAN, 2013, vol. 1, pp. 158-163. (In Russ.)
- Vilesov A.P., Nikitin Yu.I., Akhtyamova I.R., Shirokovskikh O.A. (2019) The frasnian reefs of the Rybkinsky group: facial structure, formation stages, oil potential. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdeniy = Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 7, pp. 4-22. (In Russ.). [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-7\(331\)-4-22](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-7(331)-4-22)
- Vilesov A.P., Nikitin Ju.I., Rikhter O.V., Makhmudova R.Kh. (2019). Sedimentological model of the Colganian Formation (Upper Devon) on the northern frame of the Sol-Iletsyky Vault. *Coll. papers: Ekzolit – 2019. Facial Analysis in Lithology: Theory and Practice*. Moscow: MSU, pp. 31-34. (In Russ.)
- Warren J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52, pp. 1-81. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2)
- Wilson M.E.J. (2012). Equatorial carbonates: an earth systems approach. *Sedimentology*, 59(1), pp. 1-31. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2011.01293.x>

About the Authors

Aleksandr P. Vilesov – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Expert in Lithology and Sedimentology
Tyumen Petroleum Research Center
42, M.Gorky st., Tyumen, 625048, Russian Federation
E-mail: apvilesov@mail.ru

Kseniya N. Chertina – Head of the Petrographic Research Laboratory
Tyumen Petroleum Research Center
42, M.Gorky st., Tyumen, 625048, Russian Federation

Manuscript received 19 September 2019;
Accepted 20 April 2020; Published 30 June 2020