

УДК 551.351:552.543

О НЕКОТОРЫХ ОБСТАНОВКАХ И МЕХАНИЗМАХ ДОЛОМИТИЗАЦИИ РИФОВ

© 2022 г. В. Г. Кузнецов^{a, b, *}

^aРоссийский государственный университет (НИУ) нефти и газа имени И.М. Губкина,
Ленинский просп., 65, Москва, 119991 Россия

^bИнститут проблем нефти и газа РАН,
ул. Губкина, 3, Москва, 119333 Россия

*e-mail: vgkuz@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.12.2021 г.

После доработки 03.02.2022 г.

Принята к публикации 29.04.2022 г.

Вторичная доломитизация рифовых образований — достаточно распространенное явление. Показано, что этими процессами затронуты как одиночные изолированные рифы, так и рифы асимметричных рифовых систем вне зависимости от аридного или гумидного климата времени рифообразования. В статье обсуждаются источники магния и способы его поступления в рифы, условия протекания процессов доломитизации и выноса растворимых продуктов реакции. Источником этого элемента могут быть как относительно глубоководные синхронные рифу депрессионные отложения, так и глинистые или солевые породы толщ выполнения рифового рельефа. Необходимым условием протекания таких процессов является возможность свободной фильтрации с удалением растворенных продуктов реакций. При отсутствии последней рифы сохраняют первичный известковый состав.

Ключевые слова: рифы, процессы доломитизации, глинистые и гидрохимические толщи заполнения рифового рельефа.

DOI: 10.31857/S0024497X22050032

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вторичная доломитизация — взаимодействие магнийсодержащих вод с кальцитом известняков с превращением последнего в доломит — явление достаточно распространенное и относительно хорошо изученное. Она проявляется как в локальном, так и региональном масштабе в карбонатных образованиях разного возраста и геологического типа. Одним из объектов карбонатного состава, где в той или иной, большей или меньшей, но иногда очень значительной степени проявляются процессы вторичной доломитизации, являются рифы — геологические образования, возникшие в результате жизнедеятельности колониальных и нарастающих организмов и представляющие собой карбонатный массив, который в период своего формирования возвышался над дном бассейна. Поскольку скорость роста рифа превышает скорость накопления окружающих осадков, его мощность больше мощности синхронных отложений, что в целом определяет холмовидную морфологию соответствующего массива.

Прекращение рифостроения — за исключением случаев геологических катастроф, например, вулканизма, — связано с регрессией и заполнением соответствующего рельефа, в зависимости от климата либо глинистыми, а затем и песчано-алевролитовыми, либо соленосными отложениями. Рифы именно этого типа являются основным объектом настоящего анализа.

КРАТКИЙ ОБЗОР РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДОЛОМИТИЗИРОВАННЫХ РИФОВ

Не ставя целью подробный или сколько-нибудь полный обзор распространения доломитизированных рифов, следует отметить, что существуют рифы практически не затронутые или крайне слабо затронутые этими процессами, каковыми являются, в частности, верхнеюрские рифы Туранской плиты.

Несколько объектов доломитизированных рифов, на примере которых обсуждается поставленная задача.

Показательным примером интенсивной, часто практически полной доломитизации рифов явля-

ются силурийские образования Иллинойского, Мичиганского и Аппалачского бассейнов США [Леворсен, 1970; Coniglio et al., 2004; Jodry, 1969; Shaver et al., 1978].

Этот объект настолько типичен с точки зрения доломитизации, что А.И. Леворсен даже описывает силурийские рифы этих бассейнов как "... бесструктурные толщи доломита с неоднородной текстурой, которые прерывают слоистые отложения с нормальной стратиграфической последовательностью. Многие из биогермов имеют центральное ядро, которое сложено плотным неслоистым доломитом, пористым и кавернозным" [Леворсен, 1970, стр. 305]. Справедливости ради, следует отметить, что доломитизированы, в том числе столь полностью, далеко не все рифы этих бассейнов.

Само рифообразование происходило во время карбонатакопления цикла А-0 (рис. 1). Говоря, собственно, о рифах, можно констатировать, что в общем случае основанием поселения колониальных рифостроящих организмов — цоколем рифа — являлся детрит иглокожих и мшанок, на котором возникала кораллово-строматопоровая ассоциация и соответственно формировались такие известняки, а затем образовывались известняки строматопорово-водорослевые; склоны рифов сложены обычно кораллово-водорослевыми известняками. Наличие рифостроящей стеногалинной биоты в не доломитизированных образованиях указывает, что формирование этих рифов происходило в бассейнах среднеокеанической солености. Разрез завершается крайне мелководными и литоральными отложениями, которые, в свою очередь перекрываются солями [Coniglio et al., 2004; Shaver et al., 1978]. Синхронные рифам депрессионные отложения сложены известняками и доломитами.

Прекращение рифообразования обусловлено накоплением эвапоритов А-1 (см. рис. 1). Во время осаждения карбонатов А-1 над рифами формировались строматолитовые пласты. После этого последовало очередное повышение солености и накопление эвапоритов А-2, в свою очередь сменившимся формированием карбонатной пачки А-2 (см. рис. 1). Последняя, что очень важно, имеет разный состав — над рифом и на его склонах это доломиты, а на удалении от рифа — известняки. Важно повторить, что Роберт Шавер с соавторами [Shaver et al., 1978] дают характеристику первичного известнякового состава рифов, а авторы подробной стратиграфии надрифовых комплексов указывают известняковый и/или доломитовый состав конусовидных рифов — пиннаклов [Coniglio et al., 2004].

В той или иной степени и достаточно часто доломитизированы рифы девона Западно-Канадского бассейна. Так, Д.Б. Лейер [1961] отмечает,

что среди девонских продуктивных рифов бассейна Альберта три объекта сложены известняками, а 28 — доломитами. Правда, наряду с полностью доломитизированными образованиями существуют и практически чисто известняковые рифы, а также частично доломитизированные объекты.

Относительно подробно изучены верхнедевонские и частично турнейские рифовые образования северного борта Муханово-Ероховского прогиба Камско-Кинельской системы [Кузнецов, 1966, 1969]. В качестве примечания следует отметить, что в шестидесятые годы прошлого столетия, во время их изучения и публикации результатов, этот интервал — заволжский горизонт — датировался ранним турне. В современных стратиграфических схемах он завершает разрез девона.

Доломиты последнего региона (рис. 2) светло-серые, иногда почти белые плотные и одновременно кавернозные породы. В шлифах встречены как мелко-, так и средне- и крупнозернистые разновидности. Как правило, кристаллы гипидиоморфные, плотно прилегают друг к другу, хотя имеется и межкристаллическая пористость (см. рис. 2в). Но одновременно присутствуют каверны разного размера — от долей мм (см. рис. 2г-е) до нескольких сантиметров. Последние, естественно, устанавливаются по образцам керна. В ряде случаев при бурении отмечалось катастрофическое поглощение бурового раствора, что, скорее всего, связано с наличием крупных, а главное, связанных друг с другом пустот. Некоторые каверны заполнены шестоватыми скаленоэдрическими кристаллами кальцита (см. рис. 2б). В большинстве случаев кристаллы доломита мутноватые за счет включений тонкодисперсного, видимо, кальцитового и глинистого материала, между которыми имеется межкристаллическая пористость. Сами кристаллы нередко имеют зональное строение с чередованием более светлых и более темных полосок. На границе с кавернами кристаллы приобретают более правильную изометричную форму и одновременно ромбовидный облик (см. рис. 2е, д). Среди плотной массы доломитов встречаются достаточно крупные выделения ангидрита, в том числе в виде крупных кристаллов, в которых, в свою очередь вкраплены ромбовидные кристаллы доломита (см. рис. 2ж). Почти сплошная доломитизация практически обусловила ликвидацию органических остатков, однако по некоторым реликтам и "теням" можно судить о первоначальном наличии фораминифер, брахиопод, водорослей; встречены также членики криноидей (см. рис. 2з). Последнее особенно важно, поскольку стеногалинная фауна, каковой являются морские лилии, свидетельствует о среднеокеанической солености водоема и, следовательно, наложенном характере доломитизации. Одновременно, наличие регенерационных каемок на подобных

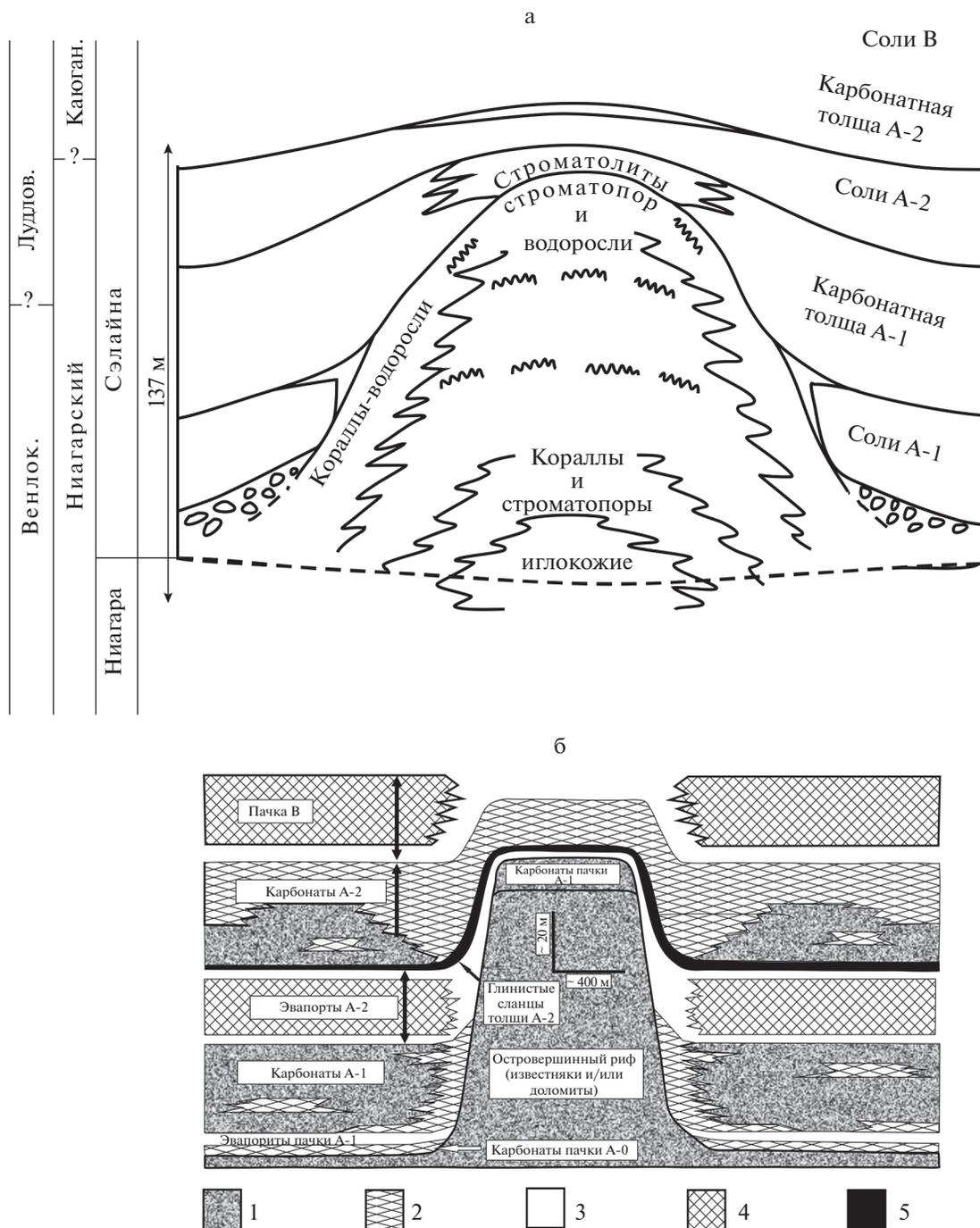


Рис. 1. Схема внутреннего строения силурийских рифов Мичиганского бассейна США (а), литологический состав и основные стратиграфические подразделения покрывающих риф отложений (б) ([Coniglio et al., 2004; Shaver, 1977; Shaver et al., 1978] с изменениями).

1 – известняки, 2 – доломиты, 3 – ангидриты, 4 – галит – каменная соль, 5 – глины.
A0–A2, B – нумерация пачек.

биогенных остатках указывает, что доломитизация скорее всего не диагенетическая, когда шло обрастание членика кальцитом, а более поздняя, катагенетическая, когда уже сменилась геохимическая обстановка и был другой источник материала, а точнее – магния. В ряде случаев видно,

как кристаллы доломита “вклиниваются” в эти регенерационные каемки.

Известны и другие примеры в той или иной мере доломитизированных рифов пермского возраста. Так, доломитизация нижнепермских ри-

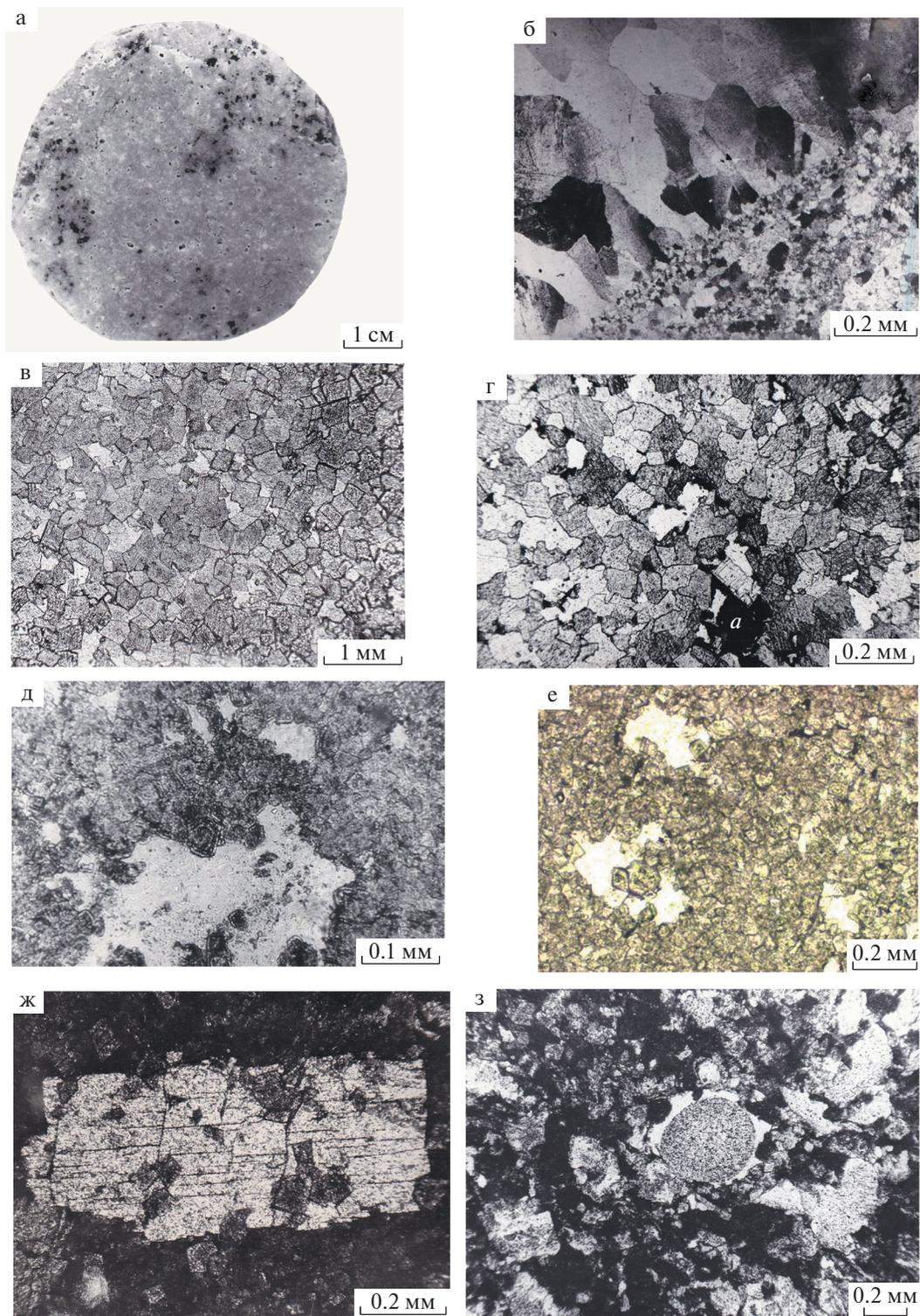


Рис. 2. Основные типы пород и пустотного пространства верхнедевонско-турнейских рифов северного борта Муханово-Ероховского прогиба.

а — доломит тонкокристаллический кавернозный, часть каверн заполнена нефтью; б — каверна в интенсивно доломитизированном детритовом известняке, выполненная скаленоэдрическими кристаллами кальцита; в — яснокристаллический доломит с межкристаллическими пустотами; г — каверны в кристаллическом доломите (а — каверна, заполненная нефтью); д, е — доломиты кавернозные, по стенкам каверн формируются ромбовидные кристаллы доломита зонального строения, регенерационная каемка; ж — кристалл ангидрита в плотном доломите, в ангидрите располагаются ромбовидные кристаллы доломита; з — членник криноидеи в интенсивно доломитизированном детритовом известняке, вокруг членника — кальцитовая регенерационная каемка.

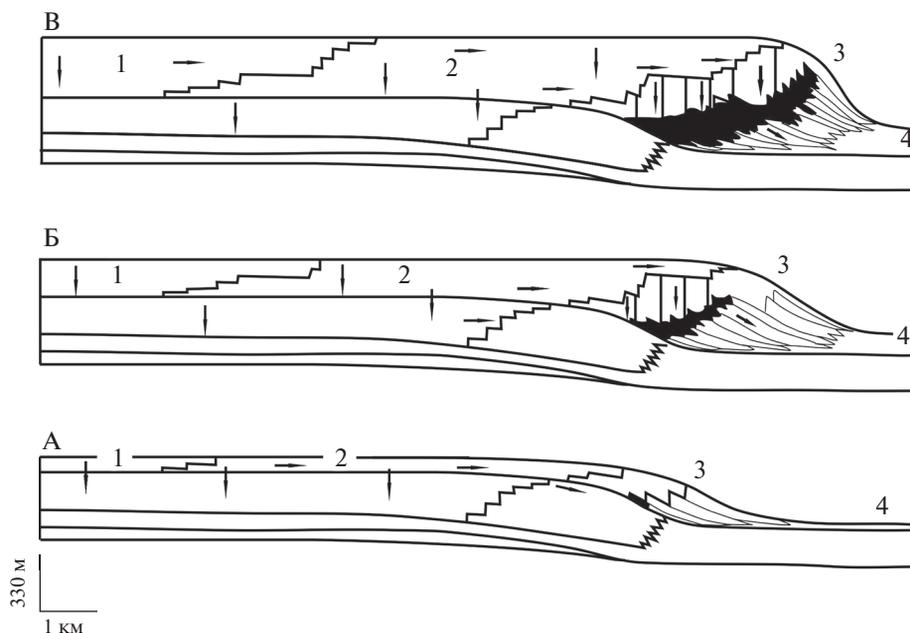


Рис. 3. Модель доломитизации (черное) формации Кэпитен на разных этапах образования рифового комплекса ([Melim, Sholle, 2002] с изменениями). Миграция доломитизирующих флюидов (направления показаны стрелками) в зарифовом водоеме вертикальная и горизонтальная, в рифовой – вертикальная, в зоне предрифового склона вновь параллельна слоистости.

а–в – время формирования: а – нижний Кэпитен, б – средний Кэпитен, в – верхний Кэпитен.

1–4 – фации: 1 – эвапоритовая лагуна, 2 – открытый шельф и лагуна с карбонатнакоплением, 3 – риф и предрифовый склон, 4 – бассейн.

фов Предуральского краевого прогиба была изучена Г.И. Теодоровичем [1942], но она не очень существенна.

Среди среднепермских цехштейновых рифов Германии встречаются объекты, которые описываются как “... крупные блокоподобные массы бесструктурных доломитов внутри нормально на слоенных цехштейновых осадков”. Надо, однако отметить, что далеко не все цехштейновые рифы Центральной Европы доломитизированы и, тем более, столь интенсивно [Кузнецов и др., 1984].

Своеобразно доломитизированы верхнепермские рифы Пермского бассейна США Уже первые исследователи этого объекта, определившие его рифовую природу, отмечали доломитизацию слагающих его известняков [King, 1942]. Отдельно останавливались на этом вопросе авторы посвященной данному объекту монографии, которые отметили интенсивную доломитизацию нижнего интервала рифового комплекса – рифа Гот-Сип и незначительную верхней его части – собственно рифа Кэпитен [Newell et al., 1953, p. 178–179]. Позднее было показано, что более молодой риф Кэпитен, тоже доломитизирован [Melim, Scholle, 2002]. Важно отметить, что основная доломитизация происходит в образованиях предрифового склона (рис. 3).

Известны интенсивно доломитизированные рифы триаса Альп и другие объекты мезозоя и кайнозоя, в том числе доломитизированы рифы современных океанов – Атлантического и Тихого.

Для последних достаточно многочисленны случаи частичной, поинтервальной, отдельными интервалами, доломитизации, или доломитизации отдельных фациальных зон рифов современных океанов. Так, неоднороден разрез тихоокеанского атолла Фуна-Фути, где верхние 100 м сложены известняками, а нижние 144 м до забоя на глубине 344 м – доломитами. На атолле Кита-Даито-Джима (о. Северное Бородино), напротив, доломитизированы верхние 103.5 м (плиоцен и плейстоцен) [Ladd et al., 1953]. Аналогичная картина установлена на ряде рифов Атлантического океана. На о. Нью-Провиденс скважина глубиной 132 м вскрыла плиоценовый и миоценовый риф, причем верхние 55 м разреза сложены известняками, а нижние 77 м – доломитами [Goodell, Garman, 1963]. На о. Андрос глубина скважины составила 4862 м, при этом были достигнуты отложения нижнего мела. Скважина прошла в основном по рифовым образованиям, причем верхние 175 м разреза сложены известняками, в интервале 175–1540 м известняки переслаиваются с доломитами, а с глубины 1540 м и до забоя (палеоцен–мел) преобладают доломиты [Ирдли, 1954; Goodell, Garman, 1963].

Таким образом, обобщая и существенно упрощая ситуацию, можно зафиксировать по крайней мере четыре вида доломитизации по характеру расположения доломита: 1 – в целом достаточно локальная доломитизация отдельных участков (риффы Предуральяского прогиба), 2 – послойная доломитизация отдельных интервалов, что характерно, в частности для кайнозойских и частично мезозойских рифов Тихого и Атлантического океанов, 3 – доломитизация образований предрифного склона (рифовый комплекс Кэпитен) и 4 – сплошная доломитизация всего массива (силурийские рифы США, частично верхнедевонские рифы северного обрамления Муханово-Ероховского прогиба).

Практически во всех случаях показано, что доломитизация рифов вторична, о чем свидетельствует целый ряд показателей. Прежде всего это наличие, хотя бы реликтов, стеногалинных организмов, и, во-вторых, отмеченные выше литологические показатели, такие, например, как формы кристаллов доломитов, вторичная кавернозность и т.д.

ПРИЧИНЫ ДОЛОМИТИЗАЦИИ РИФОВ И МЕХАНИЗМЫ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ

При выяснении причин частой избирательной доломитизации рифов следует, по-видимому, рассмотреть три взаимосвязанных проблемы – источники магния, механизмы и пути его поступления в рифы, и, наконец, возможные пути и способы удаления растворимых продуктов доломитизации.

Существует ряд предположений и объяснений вторичной доломитизации рифов. Одной из наиболее распространенных, известной и популярной является схема “фильтрационного отлива” (seepage reflux) [Adams, Rhodes, 1960], которая недавно поддержана Л. Мелим и П. Шолле [Melim, Scholle, 2002]. Суть гипотезы состоит в том, что в условиях аридного климата в зарифовой лагуне соленость повышается до стадии садки сульфатов кальция. При этом, во-первых, возрастает плотность воды, и, во-вторых, в связи с удалением кальция в сульфат – вода относительно и абсолютно обогащается магнием, что, в частности, выражается в повышении магний-кальциевого отношения до 8.0–8.5. Полезно напомнить, что в современном океане ионов магния только в три раза больше, чем ионов кальция (1.30 г/кг против 0.41 г/кг). Эти более тяжелые лагунные воды опускаются на дно, фильтруются через рифовый массив, разгружаясь в глубоководный бассейн, осуществляя при этом доломитизацию пород. Подобный способ имеет ряд ограничений. Во-первых, он может реализоваться только при доломитизации барьерных рифов, имеющих лагуну, и, во-вторых, только в условиях аридного клима-

та. Другими словами, он не применим к рифам гумидных обстановок, к одиночным рифам, не имеющим зарифовой лагуны. Относительно рифов комплекса Кэпитен, на примере которого был разработан механизм фильтрационного отлива, возникает также вопрос, почему процесс доломитизации начинается не в самом рифе, не затронул собственно ядро, а происходит уже на его внешнем склоне на границах с бассейном разгрузки. Другими словами, почему доломитизируются наиболее удаленные от лагуны – источника магния – породы предрифного склона, а не ближайшие к лагуне “ядерные” области рифов. Более того, известен целый ряд случаев часто существенной или даже полной доломитизации рифов, формировавшихся в бассейнах гумидной зоны со среднеокеанической соленостью, где никаких эвапоритов не было и нет, как, например, девонский риф Кларк-Лейк Канады (рис. 4), в том числе в случаях, где не было зарифовых лагун, каковы были, например, отмеченные выше верхнедевонские рифы северного борта Муханово-Ероховского прогиба и др.

Эта схема не применима в случае отсутствия зарифовой лагуны, что достаточно типично для обширных мелководных бассейнов на палеозойских платформах, в случае одиночных рифов среди в той или иной степени глубоководного бассейна, как это имеет место в силуре Мичиганского и Иллинойского и Аппалачского бассейнов США, а также, что наиболее важно и достаточно распространено, в бассейнах, расположенных в зонах гумидного климата и вообще бассейнов, обладающих среднеокеанической соленостью.

Учитывая все это, интересно и полезно рассмотреть, во-первых, вмещающие комплексы, синхронные рифам и покрывающие риф, как возможные источники магния и, во-вторых, соответственно, процессы, которые вели, или могли вести к доломитизации первичных известняков рифа.

Весьма наглядную схему поступления магния и доломитизации рифового массива представил Р. Джодри для упомянутых выше доломитизированных силурийских рифов США [Jodry, 1969] (рис. 5).

Собственно, рифообразование происходило в водоемах среднеокеанической солености, о чем свидетельствует наличие указанных выше стеногалинных организмов-рифостроителей.

После определенной изоляции бассейнов и соответственно ограниченного поступления океанических вод, при интенсивном испарении соленость водоема повышалась, начиналась садка ангидритов и солей, и рифообразование прекращалось. Межкристаллические растворы этих солей под действием возрастающего давления удалялись и фильтровались через пористый и проница-

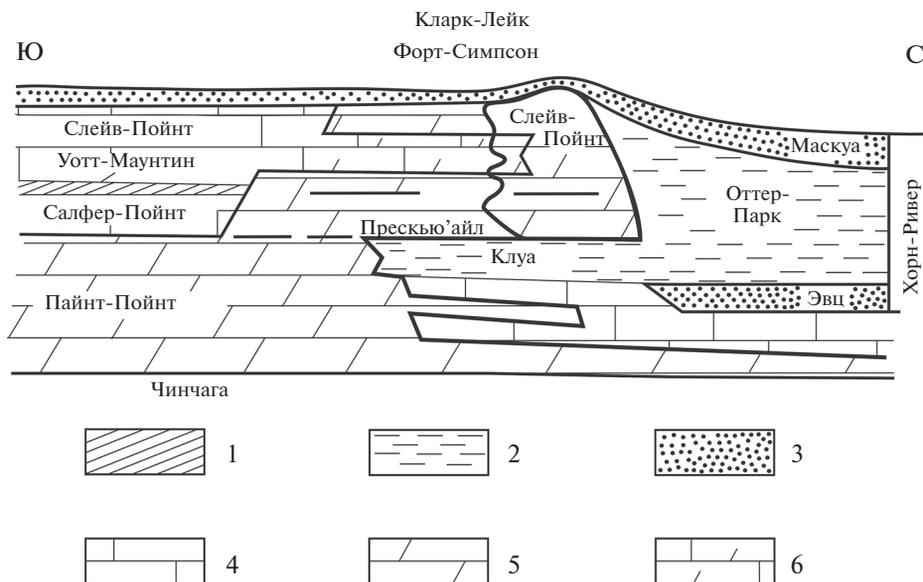


Рис. 4. Литолого-фациальный профиль продуктивного девонского рифа Кларк-Лэйк, Канада ([Grey, Kassube, 1963] с изменениями).

1 – зеленые глины Уотт-Маунтин; 2 – темно-серые сланцеватые глины; 3 – битуминозные слоистые глины; 4 – известняки; 5 – доломиты; 6 – известняки доломитизированные.

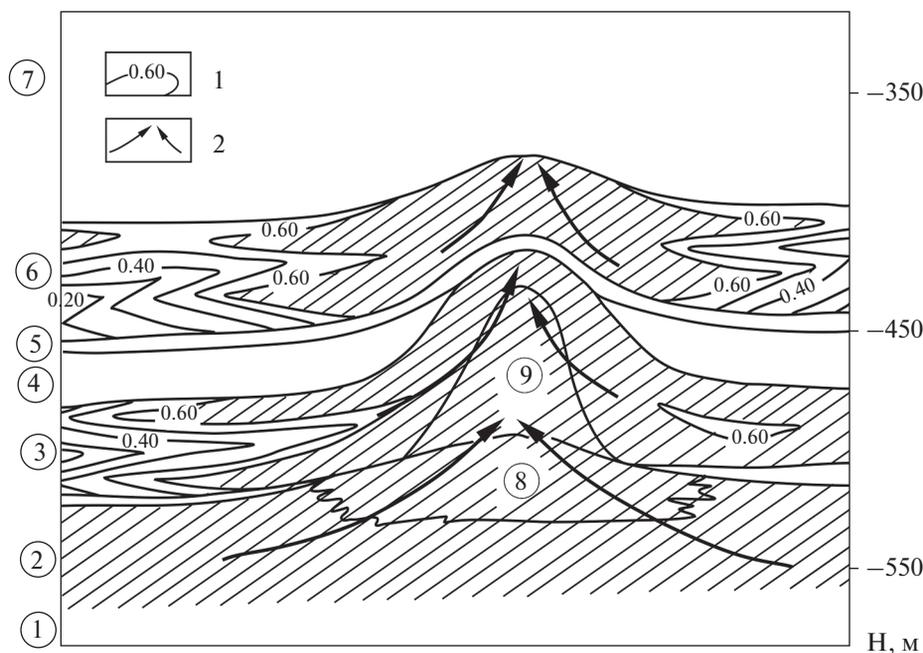


Рис. 5. Схема фильтрации флюидов и распределения доломитизированных участков в рифе Марине-Сити и покрывающих отложениях. Мичиганский бассейн, США. Силур ([Jodry, 1969] с изменениями).

1 – отношение Mg/Ca (заштриховано значения Mg/Ca > 0.60); 2 – предполагаемое направление миграции и разгрузки магнийсодержащих доломитизирующих вод. Стратиграфические подразделения (цифры в кружках): 1 – Клинтон; 2 – Ниагара; 3 – карбонаты А-1; 4 – соли А-2; 5 – ангидриты А-2; 6 – карбонаты А-2; 7 – соли В; 8 – риф серии Ниагара; 9 – риф А-1.

емый рифовый массив, что и вело к доломитизации пород последнего. Более того, именно этим можно объяснить локальную, именно над рифом и на его верхних склонах, доломитизацию надри-

фовых карбонатных пород в силурийских образованиях США (см. рис. 1б).

В принципе, с некоторыми и нередко существенными коррективами, аналогичный меха-

Таблица 1. Частота встречаемости проб с различными концентрациями некоторых элементов в мелководных известняках и вторично доломитизированных рифах Оренбургской области

Элементы	Разделительные концентрации (г/т)	Частота встречаемости (%) в фациях	
		шельфовых	рифовых
Ni	≤ 7	47.0	70.5
	>25	0	2.3
V	<4	64.7	88.7
	>25	2.0	2.3
Cu	≤5	35.3	63.6
	>10	13.7	2.3
	>25	0	0
Sr	<100	23.3	52.5
	<200	46.3	67.5
	<500	87.8	90.0
	>1000	0	5

низм может быть реализован и в рифах гумидных областей. На примере целого ряда объектов показано, что глубоководные синхронные рифам “депресссионные” отложения в той или иной степени обогащены магнием. Относительно повышенное содержание этого элемента установлено в глубоководных отложениях как в бассейнах рифообразования, так и без него (содержат то или иное, повышенное количество магния) [Кузнецов, 2019; Немова и др., 2010, 2011; Roel, Weinbrsndt, 1985]. Существенно больше этого элемента и в иловых водах, примыкающих к бортам рифов и покрывающих рифы, и в связанных с ними толщах выполения — глинах и тем более гидрохимических отложениях. При возрастании давления, соответствующие иловые, а затем и пластовые воды отжимаются и фильтруются через проницаемое тело рифов, что и определяет доломитизацию последних.

Скорее всего, такой механизм, в частности, реализован при доломитизации рифов северного обрамления Муханово-Ероховского прогиба. Магний поступал из расположенной южнее депрессионной осевой части Камско-Кинельской впадины. Битуминозно-кремнистые глинисто-карбонатные отложения — “доманиковые фации” — были обогащены целым рядом элементов, в том числе магнием. Вторым источником этого элемента были поровые воды глинистых отложений толщи выполнения рельефа малиновского надгоризонта нижнего визе. При общем региональном погружении и, соответственно, увеличении давления эти воды фильтровались через более проницаемые рифы, где и происходили реакции с образованием доломита. Первоначально кальцит переходил в растворимую форму бикар-

боната, который, реагируя с магниесодержащими водами, формировал доломит.

Этот процесс сопровождался и изменением содержания ряда малых элементов (табл. 1). Дело в том, что известняки рифа и зарифовых — шельфовых — фаций литологически изначально близки друг к другу и, соответственно, содержания этих малых элементов были практически одного порядка. При переводе кальцита известняков в бикарбонатную форму в раствор переходили и сохранившиеся в них такие элементы, как никель, ванадий, медь, стронций, уран [Данчев, Кузнецов, 1966; Кузнецов, Пийп, 1974] которые и выносились из пород рифов (рис. 6). При этом в шельфовых фациях есть породы с более высокими, чем в рифах содержаниями элементов (V), либо модальный интервал распределения их распределения в них выше такового в рифах (Ni), либо отмечается и то и другое (Cu, Cr) (рис. 7, см. табл. 1). Добавим, что минимальные содержания этих элементов в рифах встречаются значительно чаще, чем в неизмененных известняках зарифового шельфа.

В случае одиночных рифов, окруженных со всех сторон депрессионными отложениями и породами толщи выполнения рифового рельефа, поступление магния и, соответственно, доломитизация охватывает тело рифа со всех сторон, и последний доломитизируется полностью. В случае асимметричных рифовых систем поступление магния одностороннее, и доломитизируются либо фронтальные зоны рифов, как это имеет место в Пермском бассейне США, либо весь риф, но процесс этот не затрагивает зарифовые “лагунные” известняки, примерами являются отмеченный выше риф Кларк-Лейк Западно-Канадского

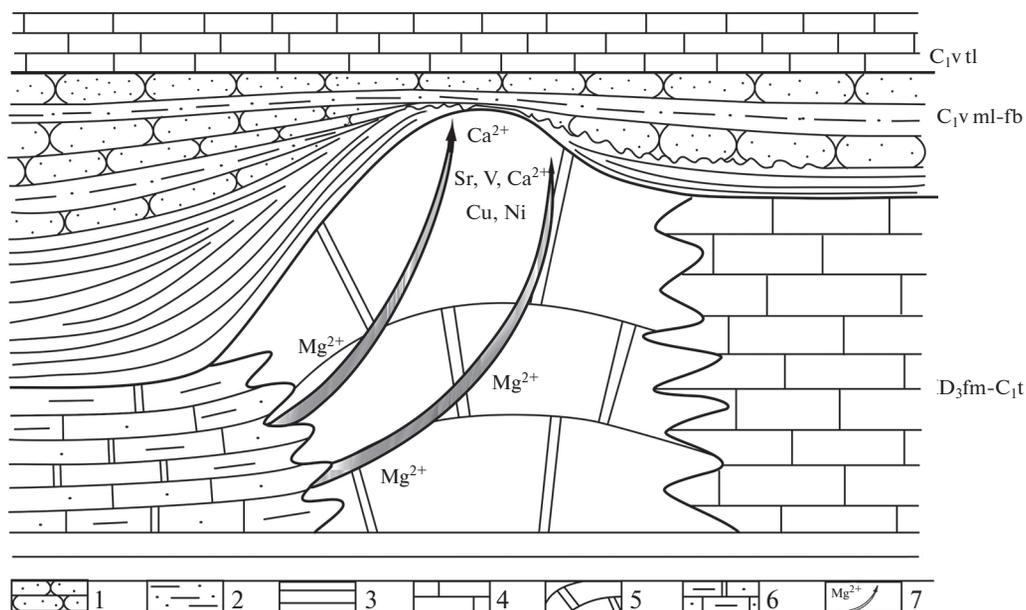


Рис. 6. Схема катагенетической доломитизации рифовых массивов, обрамляющих Камско-Кинельскую впадину. 1 – песчаники; 2 – алевролиты; 3 – глины; 4 – известняки полидетритовые мелководные; 5 – доломиты; 6 – битуминозно-кремнистые глинисто-карбонатные глубоководные отложения; 7 – пути вноса доломитизирующих растворов и выноса образовавшихся растворенных компонентов.

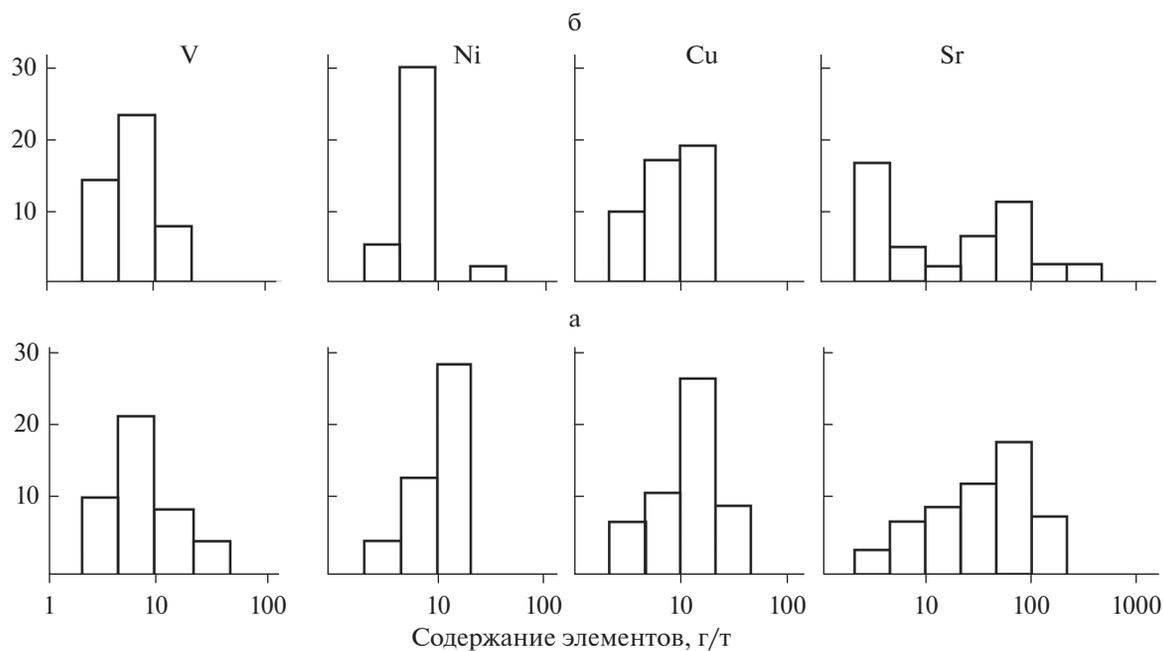


Рис. 7. Гистограммы распределения содержаний элементов в шельфовых и рифовых фациях верхнего девона–турне северного обрамления Муханово-Ероховского прогиба. а, б – фации (а – шельфовые, б – рифовые).

бассейна [Gray, Kassube, 1963] и рифы северного обрамления Муханово-Ероховского прогиба.

Обсуждая подобную схему поступления магния и процессы доломитизации рифов, естественно, возникает вопрос, почему далеко не все рифы, в

том числе перекрытые гидрохимическими отложениями, доломитизированы или доломитизация их весьма незначительна. Такая ситуация имеет место в упоминавшихся выше нижнепермских рифах Предуралья Краевого прогиба

или верхнеюрских рифах эпигерцинской Туранской платформы в Западном Узбекистане, и в ряде других объектов.

По-видимому, помимо источника магния, необходимо не только его постоянное поступление, но и **вынос** растворимых продуктов доломитизации, то есть возможность достаточно свободной фильтрации через рифовый массив и покрывающие его отложения. Последнее весьма отчетливо и убедительно реализуется в силурийских рифах США. Пока бассейн сохраняет среднеокеаническую соленость, происходит рост рифов. Снижение уровня моря и сопутствующее повышение солености ведет к осушению поверхности (кровли) рифов и садке солей. При этом собственно кровля рифов находится выше уровня водоема, что в целом определяет возможность фильтрации магнийсодержащих вод, реализацию самого процесса доломитизации и, одновременно, удаление растворимых продуктов реакции. Подобный процесс отжатия магнийсодержащих вод и доломитизации продолжается и после последующего повышения уровня водоема и возобновления карбонатакопления. В случае наличия над рифами карбонатных пластов и пачек известняков — продуктов седиментации водоемов среднеокеанической солености следующего цикла седиментации, они тоже могут доломитизироваться. Таково, например, образование доломита надрифовых карбонатных пластов цикла А-2, перекрывающих силурийские рифы (см. рис. 1). Подобные процессы могли происходить в случае полного осушения кровли рифов, что и обеспечивало фильтрацию магнийсодержащих вод, доломитизацию и удаление новообразованных растворимых продуктов. Если же кровля рифового массива не достигала уровня моря, и после повышения солености сразу же покрывалась солями, фильтрация через него растворов магния и вынос новообразованных растворов были невозможны или крайне ограничены, и доломитизация не происходила.

Аналогично, в случае асимметричных рифовых систем, доломитизирующие растворы, отжимаемые из отложений, прилегающих к фронтальным частям рифов, просачиваясь через риф, реализуют свой “доломитизирующий потенциал” и уже “чистые”, свободные от магния проникают в зарифовые отложения, не меняя их исходного состава; примером последних является упомянутый выше риф Кларк-Лейк Канады [Grey, Kasube, 1963].

Предложенные механизмы и обстановки доломитизации рифов отнюдь не универсальны и всеобщы. Известны примеры существенной, но “послойной” доломитизации, где подобная схема явно не могла реализоваться. Наглядным примером является доломитизация ряда рифов кайно-

зоя и частично мезозоя Тихого и Атлантического океанов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все основные условия доломитизации, сформулированные в начале статьи, присутствуют и реализуются в случае доломитизации рифов.

Источником магния являются, во-первых, в той или иной мере глубоководные отложения “депрессивных” фаций, обрамляющие одиночные рифы со всех сторон, а в случае рифов асимметричных систем — примыкающие к фронтальной стороне последних, обращенной в сторону глубоководного бассейна. Во-вторых, этот элемент может поступать из иловых, а затем пластовых вод толщ выполнения рифового рельефа — глинистых толщ в зонах гумидного климата, и сульфатно-солевых — аридного.

Сами рифы, как объекты изначально пористые и проницаемые, обеспечивают активное поступление и фильтрацию через них магнийсодержащих растворов.

Наконец, в-третьих, возвышение кровли рифов, в том числе при выходе их выше уровня водоема и осушении, обеспечивает разгрузку и удаление продуктов реакции. Этим, в частности, объясняется вторичная доломитизация покрывающих рифы карбонатных пластов.

В случае невозможности или существенной ограниченности подобной вертикальной миграции, доломитизация либо отсутствует, либо резко ограничена.

Рассмотренный механизм ни в коем случае не исключает иных способов и процессов, ведущих к частичной или полной доломитизации рифовых образований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данчев В.И., Кузнецов В.Г.* О распределении урана в турнейских отложениях западной части Оренбургской области // Геохимия. 1966. № 7. С. 870–873.
- Ирдли А.* Структурная геология Северной Америки. М.: ИЛ, 1954. 666 с.
- Кузнецов В.Г.* Доломитизированные рифы турне Оренбургской области // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1966. Т. 41. № 4. С. 155–156.
- Кузнецов В.Г.* Турнейские рифы Оренбургской области // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1969. Т. 44. № 1. С. 78–87.
- Кузнецов В.Г.* Доломиты — основные коллекторы битуминозных толщ // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2019. № 12. С. 40–47.
- Кузнецов В.Г., Курце М., Смильгис И.И. и др.* Рифы нижнего цехштейна Восточной Европы // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1984. № 1. С. 51–65.

- Кузнецов В.Г., Пийн Н.Б. Стронций в турнейских отложениях Оренбургской области // Геохимия. 1974. № 4. С. 585–593.
- Леворсен А.И. Геология нефти и газа. М.: Мир, 1970. 639 с.
- Лейер Д.Б. Распространение нефти. М.: Гостоптехиздат, 1961. С. 33–43.
- Немова В.Д., Колосков В.Н., Гаврилов С.С., Покровский Б.Г. Стадийность и направленность вторичных преобразований пород-коллекторов нижнетурнейской подсистемы на западе Широкого Приобья // Геология нефти и газа. 2010. № 6. С. 22–28.
- Немова В.Д., Колосков В.Н., Покровский Б.Г. Формирование карбонатизированных коллекторов в глинисто-кремнистых отложениях баженовского горизонта на западе Широкого Приобья // Разведка и охрана недр. 2011. № 12. С. 31–35.
- Теодорович Г.И. Доломитизация рифовых образований Ишимбаевского нефтеносного района // Докл. АН СССР. 1942. Т. 34. № 6. С. 175–179.
- Adams J.E., Rhodes M.L. Dolomitization by seepage reflux // AAPG Bull. 1960. V. 44(12). P. 1912–1920.
- Coniglio M., Frizzell R., Pratt B.R. Reef-capping laminites in the upper Silurian carbonate-evaporite transition, Michigan Basin, south-western Ontario // Sedimentology. 2004. V. 51(3). P. 653–668.
- Goodell H.G., Garman R.K. Carbonate geochemistry of super deep test well, Andros Island, Bahamas // AAPG Bull. 1963. V. 53(3). P. 513–536.
- Gray F.F., Kassube J.R. Geology and stratigraphy of Clark Lake gas field, British Columbia // AAPG Bull. 1963. V. 47(3). P. 467–483.
- Jodry R.L. Growth and Dolomitization of Silurian Reefs, St. Clair Country, Michigan // AAPG Bull. 1969. V. 53(4). P. 957–981.
- King Ph.B. Permian of West Texas and southeastern New Mexico // AAPG Bull. 1942. V. 26(4). P. 535–763.
- Ladd A.S., Ingerson E., Townsend R.S., Russel M., Stephenson H.K. Drilling in Enivetok Atoll, Marshall Islands // AAPG Bull. 1953. V. 37(10). P. 2257–2280.
- Melim L.A., Scholle P.A. Dolomitization of the Capitan Formation fore reef facies (Permian, west Texas and New Mexico): seepage reflux revisited // Sedimentology. 2002. V. 49(6). P. 1207–1227.
- Newell N.D., Rigby J.K., Fisher A.G. et al. The Permian reefs complex of the Guadalupe Mountains Region, Texas and New Mexico. San Francisco: Freeman, 1953. 236 p.
- Roehl P.O., Weinbrandt R.M. West Cat Canyon Field // Carbonate Petroleum reservoirs. N. Y.: Springer, 1985. P. 526–545.
- Shaver R.H. Silurian reef geometry – new dimensions to explore // J. Sediment. Petrol. 1977. V. 47(4). P. 1409–1424.
- Shaver R.H., Ault C.J., Ausich W.L. et al. The Search for a Silurian Reef Model Great Lakes Area // Department of Natural Resources Geological Survey. Special. Report 15. Indiana, 1978. 36 p.

On Some Settings and Mechanisms of the Reef Dolomitization

V. G. Kuznetsov^{1, 2, *}

¹Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Leninsky ave., 65, Moscow, 119991 Russia

²Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences, Gubkin str., 3, Moscow, 119333 Russia

*e-mail: vgkuz@yandex.ru

Secondary dolomitization of reef formations is a fairly common phenomenon. Both isolated reefs and reefs of asymmetric reef systems are known to be affected by these processes, regardless of the arid or humid climate of the reef formation time. The article discusses the sources of magnesium and the methods of its income into reefs, the conditions of the processes and the removal of soluble reaction products. Both relatively deep-water depression deposits synchronous to the reef, and clay or salt rocks of the reef relief strata can be the source of this element. A necessary condition for the occurrence of these processes is the possibility of free filtration and removal of dissolved reaction products. In the absence of the latter, reefs retain their primary limestone composition.

Keywords: reefs, dolomitization processes, clayey and hydrochemical strata filling the reef relief.