

УДК 552.543

В.А. Жемчугова¹, Е.Е. Маслова²**ВТОРИЧНАЯ ДОЛОМИТИЗАЦИЯ КАК ФАКТОР,
ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА
НИЖНЕДЕВОНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОСТОЧНОГО БОРТА
ХОРЕЙВЕРСКОЙ ВПАДИНЫ
(ТИМАНО-ПЕЧОРСКИЙ НЕФТЕГАЗОНОСНЫЙ БАССЕЙН)***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Нижнедевонские отложения охарактеризованы с точки зрения их состава, строения, вторичных преобразований; проанализировано распределение различных типов пустотного пространства и выделено несколько типов доломитовых структур. Результаты наших исследований свидетельствуют о том, что в зависимости от проницаемости, растворимости и первичной структуры карбонатной породы или осадка, а также температуры, объема и продолжительности воздействия доломитизирующих флюидов доломитизация может приводить как к увеличению, так и к уменьшению пористости.

Ключевые слова: вторичная доломитизация, карбонатные породы, Тимано-Печорский нефтегазоносный бассейн, Хорейверская впадина, нижний девон.

The Lower Devonian deposits were characterized in terms of their composition, texture and secondary transformations, the distribution of various types of pore space was analyzed and several types of dolomite textures were identified. The analysis showed that permeability, solubility and primary texture of carbonate rock or sediment, as well as temperature, volume and exposure time of dolomitizing fluids are key factors for dolomitization and depending on these factors dolomitization can lead to not only increase but also decrease of porosity.

Key words: secondary dolomitization, carbonate rocks, Timan-Pechora basin, Khoreyver depression, Lower Devonian.

Введение. Доломитовые коллекторы составляют значительную долю в общем балансе коллекторов нижнепалеозойского комплекса Тимано-Печорского бассейна и содержат промышленные скопления углеводородов. Изучение процессов доломитообразования началось более 200 лет назад, но, несмотря на многолетние исследования, эта тема остается предметом нескончаемых споров, в настоящее время существуют различные точки зрения на механизмы образования доломитов и возникновения в них пустот. Только в последние годы у седиментологов сформировалось частичное понимание природы этого процесса. В связи с этим изучение процессов доломитизации и их влияния на формирование пустотного пространства в карбонатных породах остается актуальным.

Материалы и методы исследования. В тектоническом отношении исследуемый район приурочен к Колвависовской ступени Хорейверской впадины (рис. 1).

Объект исследования — нижнедевонские отложения, практически полностью представленные вторичными доломитами, в связи с чем были

подробно изучены процессы доломитизации и влияющие на них факторы, рассмотрены основные модели доломитообразования. Выполнено макро- и микроскопическое изучение нижнедевонских отложений (215 м керна и более 600 шлифов), а также проанализированы результаты петрофизических исследований образцов керна и данные о минеральном составе пород и изотопном составе углерода и кислорода.

Результаты исследований и их обсуждение. Структурная типизация нижнедевонских доломитов. Доломитизация может протекать в несколько этапов — начаться в седиментационную стадию и наиболее ярко проявиться в диагенетическую. В случае замещения арагонита или кальцита доломитом протекают изменения, заключающиеся в более существенной перестройке, чем просто обмен ионами. Замещение происходит путем обмена объема на объем, который не может быть выражен единым химическим уравнением [Фридман, Сендерс, 1970].

На разных стадиях литогенеза структура и состав доломитов претерпевают различные преоб-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых; докт. геол.-минер. н., профессор; e-mail: zem@gds.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; e-mail: maslova-liza@mail.ru

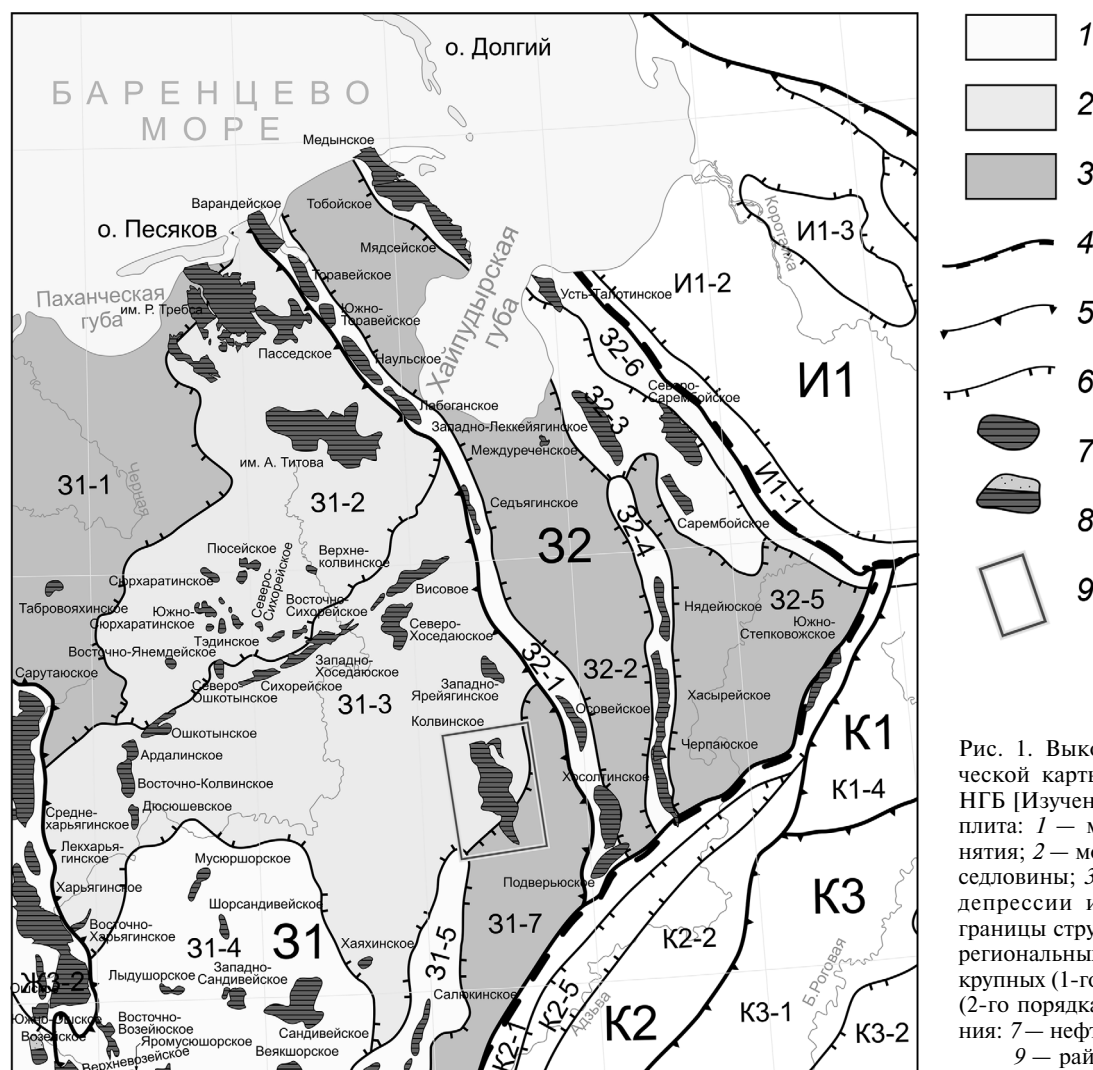
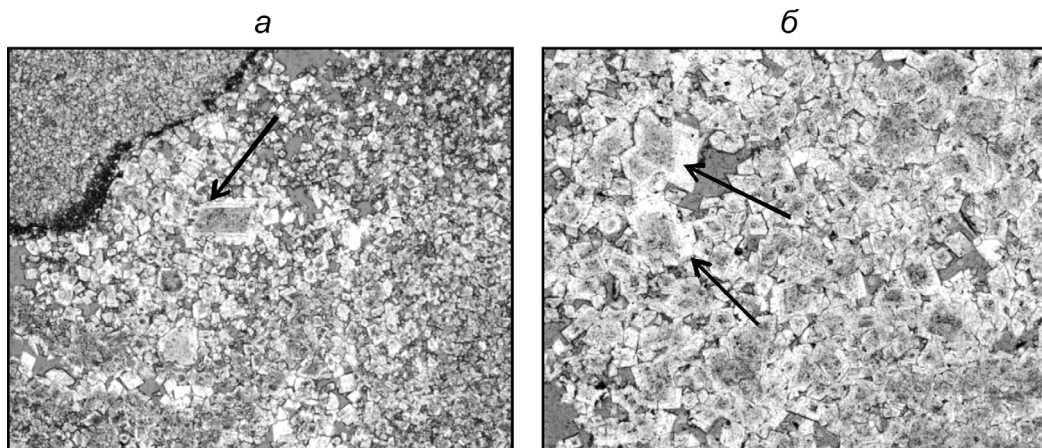


Рис. 2. Зональные кристаллы доломита



случае форма зерна также может быть сохранена, а внутренняя структура — нет. Во многих доломитах остаются лишь очень слабые очертания первичных карбонатных зерен, образуется так называемая теневая структура. Цемент и кристаллы, выполнявшие пустоты в исходной породе, также могут быть частично или полностью замещены.

Органогенные остатки неодинаково поддаются доломитизации, иногда развитие этого процесса определяется их первоначальным минеральным составом. Арагонит и высокомагнезиальный кальцит гораздо более восприимчивы к доломитизации, чем кальцит с низким содержанием магния. Это может привести к частичной доломитизации с последующим выщелачиванием недоломитизированных остатков (с образованием слепковой пористости).

Размеры кристаллов доломита зависят от количества очагов их зарождения и скорости их роста. Как правило, в мелкозернистых осадках присутствует множество потенциальных центров кристаллизации, и, следовательно, они вероятнее заместятся более мелкокристаллическим доломитом. Равномернокристаллические доломиты обычно представляют собой одну фазу образования.

Кристаллическая структура доломитов может быть описана в соответствии с размерами и формой кристаллов. По форме кристаллы подразделяются на три основные группы: идиоморфные (эвгедральные), гипидиоморфные (субгедральные) и ксеноморфные (ангедральные). На основе структурных характеристик [Gregg, Sibley, 1984] идиоморфный и гипидиоморфный доломит подразделяют на четыре подкатегории, а ксеноморфный доломит — на три.

В соответствии с этой классификацией в разрезе изученных скважин выделены следующие типы структур доломита, свидетельствующие о разных условиях их образования (рис. 3):

- идиоморфный;
- идиоморфный порфиновый;
- идиоморфный, заполняющий пустоты;
- гипидиоморфный;
- ксеноморфный;
- «жильный».

Седиментационно-емкостная модель нижедевонских отложений. Согласно существующим представлениям накопление нижедевонских отложений на восточном борту Хорейверской впадины происходило главным образом в условиях мелководных сублиторалей и примыкающих к ним обширных приливно-отливных равнин. Сублиторальный комплекс включает фации сублиторали с микритово-глинистой седиментацией (глинистая сублитораль), сублиторали с биокластово-бактериально-водорослевой седиментацией (водорослевая сублитораль) и карбонатной отмели с биокластовой и каркасной седиментацией, а литоральный комплекс — фации супралиторали и литорали с карбонатной и глинисто-карбонатной седиментацией.

В фации *супралиторали* преобладают пелитоморфные глинистые доломиты либо доломиты с гипидиоморфной структурой; идиоморфные кристаллы не встречены, также отсутствует «жильный» доломит, поскольку в этих отложениях изначально не было крупных пор и каверн. В отложениях фации супралиторали присутствуют тонкослойчатые водорослевые ламиниты, содержащие примесь кварца и глинистого материала (рис. 4, а). Биокласты практически не встречаются.

Отложения фации *литорали* представлены преимущественно микро- и тонкокристаллическими доломитами по бактериально-водорослевым и литокластовым известнякам. Преобладают гипидиоморфные и ксеноморфные структуры (размеры кристаллов в основном составляют 0,01–0,05 мм, реже до 0,25 мм), однако отмечено присутствие и идиоморфного, и «жильного» доломита.

Породы неравномерно обогащены глинистой, мелкопесчаной и алевритовой примесью. В некоторых образцах наблюдается наличие реликтового глинисто-известкового компонента, который встречается преимущественно в виде комков пелитоморфного кальцита (рис. 4, б). В доломитах прослеживается мелкопеллоидная структура.

В отложениях литорального комплекса пустотное пространство либо отсутствует, либо его объем незначителен; поры в основном единичные

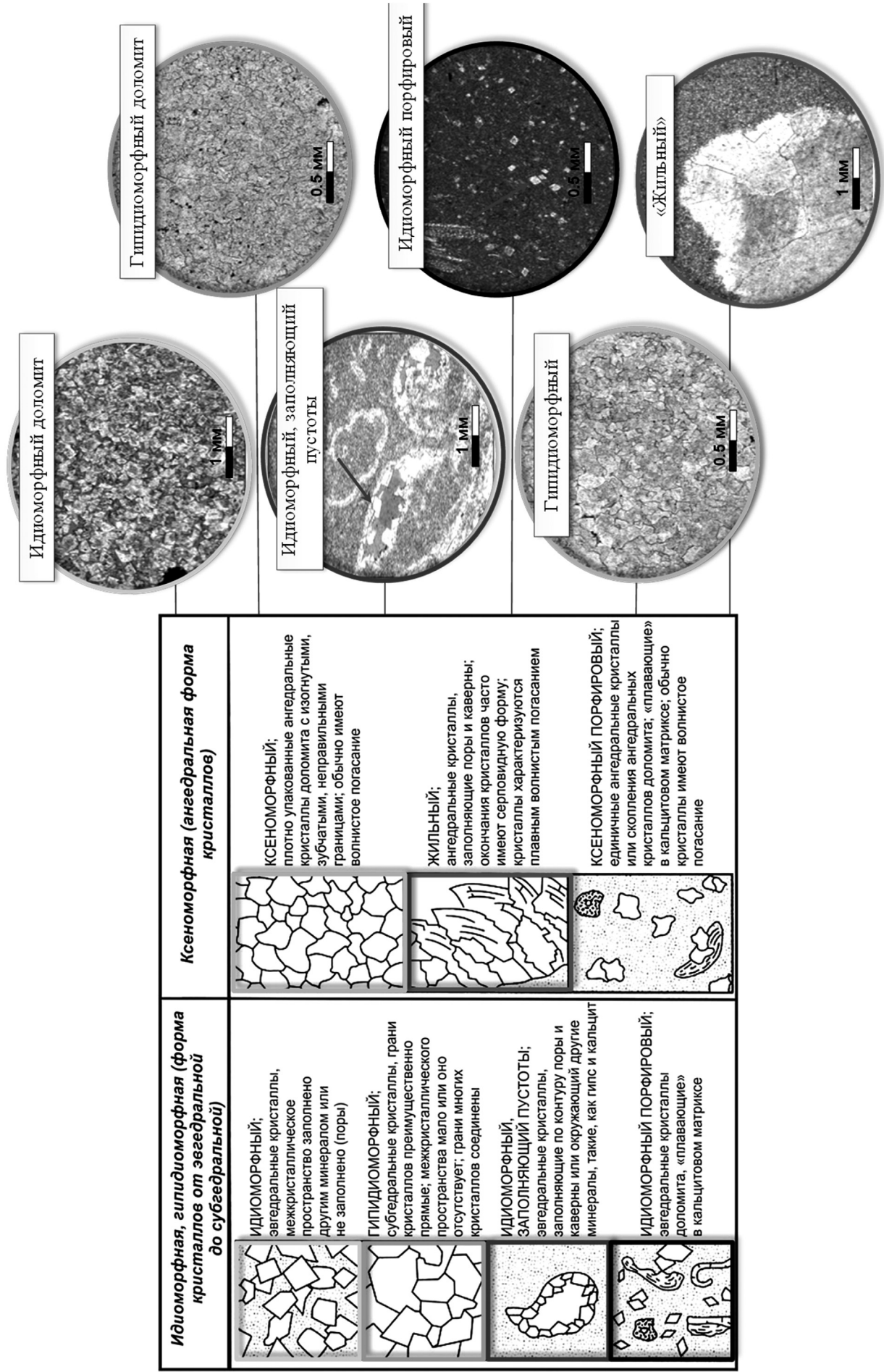
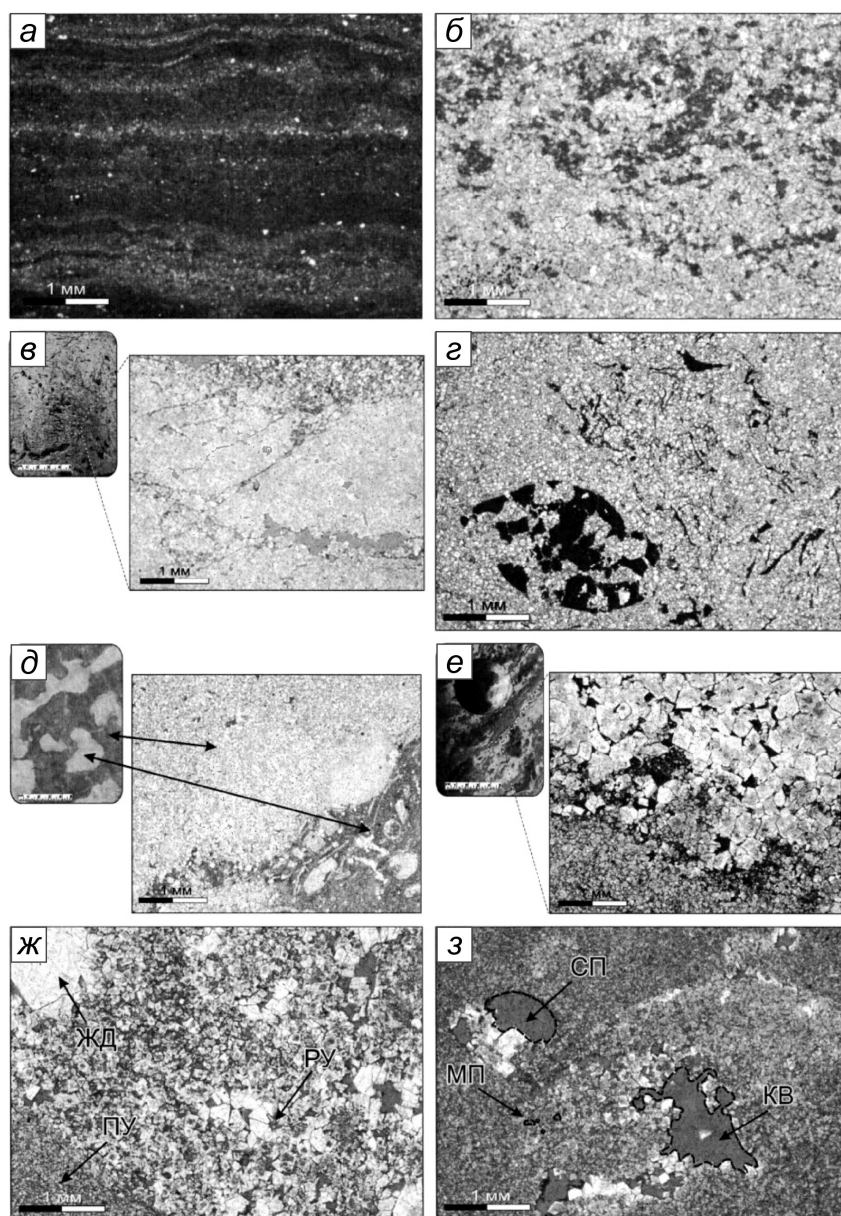


Рис. 3. Классификация доломитов по структуре и форме кристаллов, по [Gregg, Sibley, 1984]

Рис. 4. Разнообразие доломитов нижнего девона: *а* — тонкослойчатые водорослевые ламиниты супралиторали; отмечено послойное обогащение глинистой примесью и зернами кварца алевритовой размерности; *б* — комки пелитоморфного кальцита в тонкокристаллических доломитах литорали; *в* — реликтовая структура во вторичных доломитах по каркасным строматопоровым известнякам, унаследованные поры (УП) в строматопоровом каркасе; *г* — замещение пиритом органических обломков в тонкокристаллическом глинистом доломите глинистой сублиторали; *д* — разнообразная форма бактериально-водорослевых желваков и их взаимоотношение с более темным матриксом; *е* — неравномерное нефтенасыщение вторичных доломитов по биокластово-бактериально-водорослевым известнякам водорослевой сублиторали, обусловленное седиментационной неоднородностью; *ж* — вторичный доломит по биокластово-бактериально-водорослевому известняку: плотная упаковка кристаллов (ПУ), «рыхлая» упаковка кристаллов (РУ), «жильный» доломит (ЖД); *з* — межкристаллические поры (МП), слепковые поры (СП) и каверны (КВ) во вторичном доломите по биокластово-бактериально-водорослевому известняку



межкристаллические. Образование микро-тонкокристаллических доломитов фаций супралиторали и литорали могло произойти при испарении морской воды на самых ранних стадиях диагенеза, сразу после осадконакопления.

Фация *карбонатных отмелей* с преобладающей биокластовой и каркасной седиментацией сложена преимущественно доломитами по строматопоровым известнякам; хорошо прослеживается реликтовая структура строматопороидей, присутствуют реликты биокластов (рис. 4, *в*). Породы этой фации сложены доломитом с разной формой кристаллов (от эвгедральных до ангедральных) и размерами (от 0,01 до 0,5 мм). В этих отложениях интенсивно проявлены процессы выщелачивания, которые привели к образованию многочисленных каверн и развитию слепковой пористости. Однако пустотное пространство было частично уничтожено вследствие заполнения каверн либо идиоморфными кристаллами доломита, выпол-

няющими по контуру трещины и каверны, либо «жильным» доломитом.

Фация *глинистой сублиторали* представлена аргиллитами с примесью доломита, глинистыми доломитами и известняками. В аргиллите доломит присутствует в основном в виде идиоморфных порфиновых кристаллов размером 0,01–0,1 мм, неравномерно распределенных в глинистой массе. В таких породах часто присутствует примесь кварцевого материала алевритовой размерности, в некоторых случаях содержание алевритового материала достигает 30%.

Тонкокристаллические доломиты глинистой сублиторали сложены преимущественно гипидиоморфными кристаллами размером 0,01–0,05 мм, в доломитах присутствуют обломки члеников криноидей, раковин брахиопод, двустворок, остракод, панцирей трилобитов. Пиритизация в отложениях глинистой сублиторали проявлена наиболее интенсивно. Пирит образует стяжения диаметром до

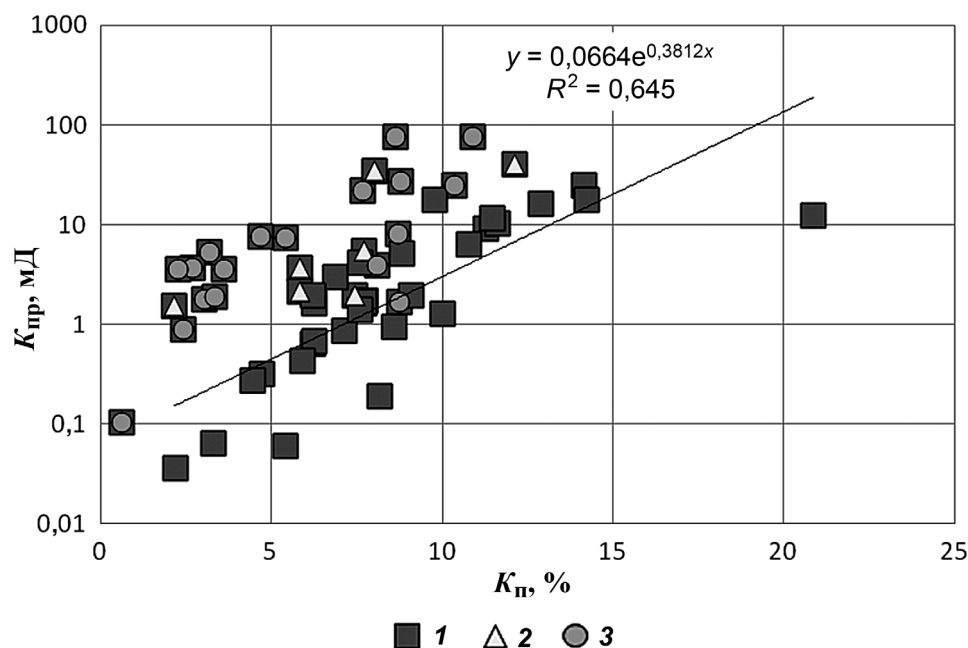


Рис. 5. График зависимости пористость–проницаемость для идиоморфных–гипидиоморфных доломитов: 1 — образцы доломита с идиоморфной — гипидиоморфной структурой; 2 — образцы с трещинами; 3 — образцы с кавернами

1 мм, замещает органогенные обломки (рис. 4, з). В породах фации отмечен только трещинный тип пустотного пространства.

Отложения *водорослевой сублиторали* представлены преимущественно нодулярными, частично доломитизированными известняками и вторичными доломитами по биокластово-бактериально-водорослевым известнякам. В нодулярных доломитизированных известняках структура доломита идиоморфная порфирая. Единичные кристаллы мелко-тонкокristаллического доломита неравномерно рассеяны в известняке, но также образуют скопления, срастаются, образуя плотную гипидиоморфную, на некоторых участках идиоморфную мозаику (рис. 4, д). В таких в разной степени доломитизированных известняках фации водорослевой сублиторали выявлен только трещинный тип пустотного пространства.

Кристаллы вторичных доломитов субгедральные, эвгедральные, их размеры варьируют от 0,01–0,1 до 0,5 мм. Неравномерное распределение кристаллов различных форм и размеров доломитов фации водорослевой сублиторали связано с тем, что доломитом замещались изначально разные по структуре участки породы, обладающие неодинаковой способностью пропускать доломитизирующий флюид (рис. 4, е, ж). В этих отложениях, как и в отложениях фации карбонатной отмели, довольно часто встречается «жильный» доломит с кристаллами размером до 2,5–3 мм. Основной тип пористости — межкристаллическая, также присутствуют каверны и трещины, единично — слепковые поры (рис. 4, з).

Такая разнокристаллическая структура доломитов сформировалась в результате нескольких этапов воздействия магнийсодержащих флюидов на породу. Во время ранних этапов доломитизации в породах с большим содержанием глинистой и

микритовой составляющих поры были слишком малы, чтобы обеспечить миграцию обогащенных магнием растворов и дать возможность кристаллам расти свободно. В изначально более пористых участках породы кристаллы доломита могли расти более свободно, формировалась их «рыхлая» упаковка. Последующее выщелачивание незамещенного доломитом кальцита в уже сформировавшейся породе способствовало образованию вторичной пористости.

С учетом выделенных доломитовых структур для тех образцов, в которых содержание доломита составляло 90% и более, были построены графики пористости–проницаемости (рис. 5–7). Так как выделить образцы, в которых определялся бы только идиоморфный доломит без присутствия гипидиоморфного, оказалось практически невозможно, зависимости составлены для идиоморфного–гипидиоморфного доломита, гипидиоморфного доломита и ксеноморфного доломита.

Анализ полученных результатов показал, что в доломите с идиоморфной–гипидиоморфной структурой (если не учитывать образцы с трещинами и кавернами) отмечена очевидная связь между пористостью и проницаемостью, обусловленная наличием межкристаллических пор, что не наблюдается в доломитах с ксеноморфной структурой, поскольку в них пустотное пространство зависит от таких преобразований, как трещиноватость и наличие каверн, образовавшихся в результате выщелачивания.

В целом в идиоморфных доломитах очевидная корреляция между пористостью и проницаемостью связана с тем, что идиоморфные кристаллы формируют коллектор с типом пустотного пространства, сходным с поровым. Подобная корреляция отсутствует в ксеноморфных доломитах, так как в них выше кавернозность и трещиноватость, они в

Рис. 6. График зависимости пористость–проницаемость для гипидиоморфных доломитов. 1 — образцы с гипидиоморфной структурой, 2 — образцы с трещинами, 3 — образцы с кавернами

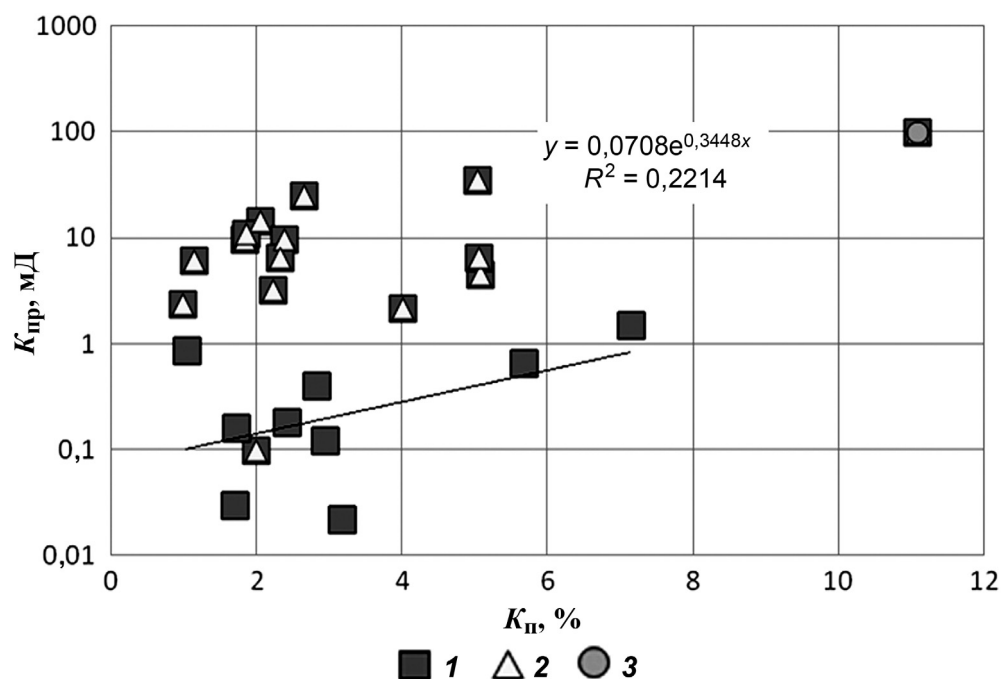
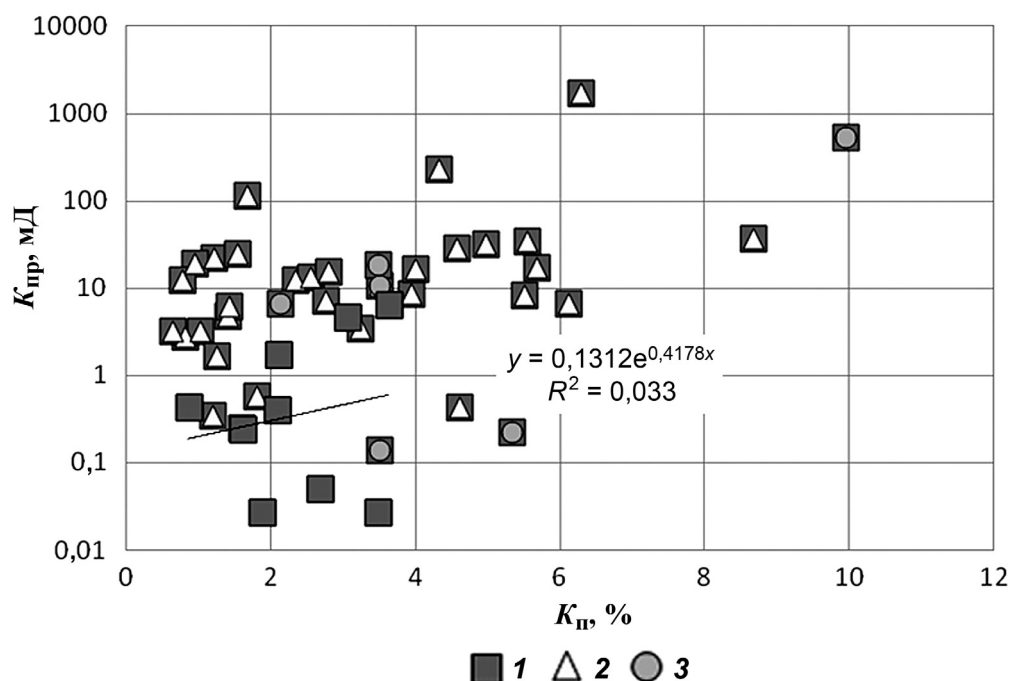


Рис. 7. График зависимости пористость–проницаемость для ксеноморфных доломитов. 1 — образцы с ксеноморфной структурой, 2 — образцы с трещинами, 3 — образцы с кавернами



большой степени выступают в качестве каверновых и трещинных коллекторов.

В преобразовании нижнедевонских отложений значительную роль играет среднедевонско-предфранский перерыв, который контролирует стратиграфическую полноту разреза продуктивных отложений и особенности выхода под размыв разных фаций (рис. 8).

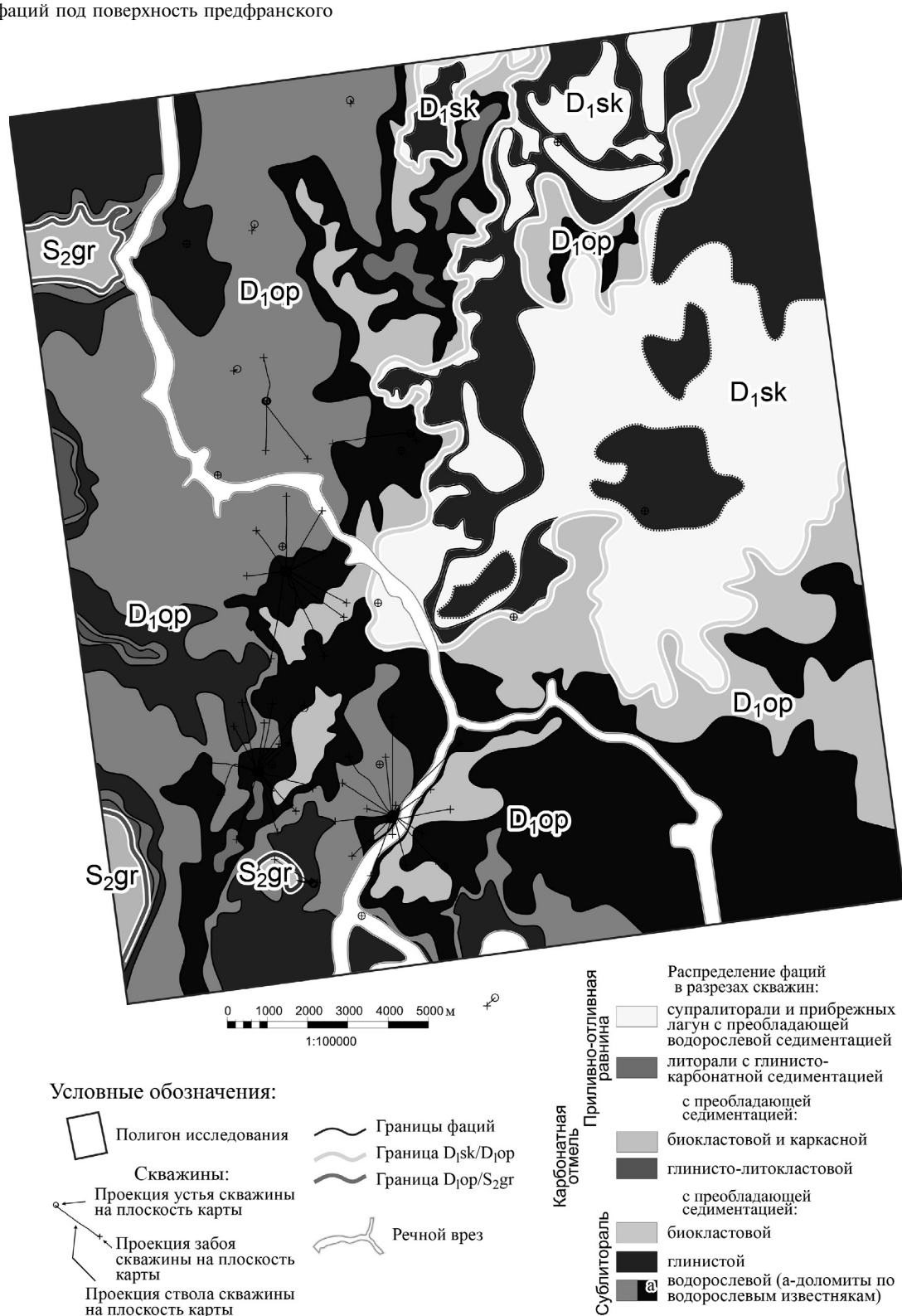
Чтобы оценить влияние размыва на доломитизацию и формирование пустотного пространства, для каждой из исследуемых скважин были построены кривые изменения по разрезу содержания доломита и коэффициента пористости и проанализировано распределение содержания доломита

при удалении от поверхности предфранского размыва (рис. 9).

Анализ распределения доломитов в разрезах изучаемых скважин показал, что интенсивность доломитизации практически не связана с положением фаций по отношению к поверхности среднедевонско-предфранского размыва. Это объясняется тем, что определяющие факторы при доломитизации отложений — их первичная структура и фильтрационно-емкостные характеристики, объем доломитизирующих флюидов и продолжительность их воздействия на субстрат.

Степень доломитизации оказывает определяющее влияние на пористость. Повышенные

Рис. 8. Карта выхода фаций под поверхность предфранского размыва



значения пористости отмечены в тех интервалах разреза, где породы полностью или практически полностью представлены доломитом. В доломитах, находящихся непосредственно под поверхностями размыва либо вблизи них, значения K_{Π} также относительно выше.

Стадийность процесса доломитизации. На рис. 10 показана стадийность процесса доломити-

зации известняка, элементы первичной структуры которого обладают разной способностью пропускать флюиды.

Процесс доломитизации в отложениях различных фаций протекает по-разному. В том случае, если присутствовала первичная пористость, а следовательно, и пространство для роста кристаллов, образовывались эвгедральные и субгедральные,

Рис. 9. Распределение значений K_{II} и содержания доломита в скв. 160

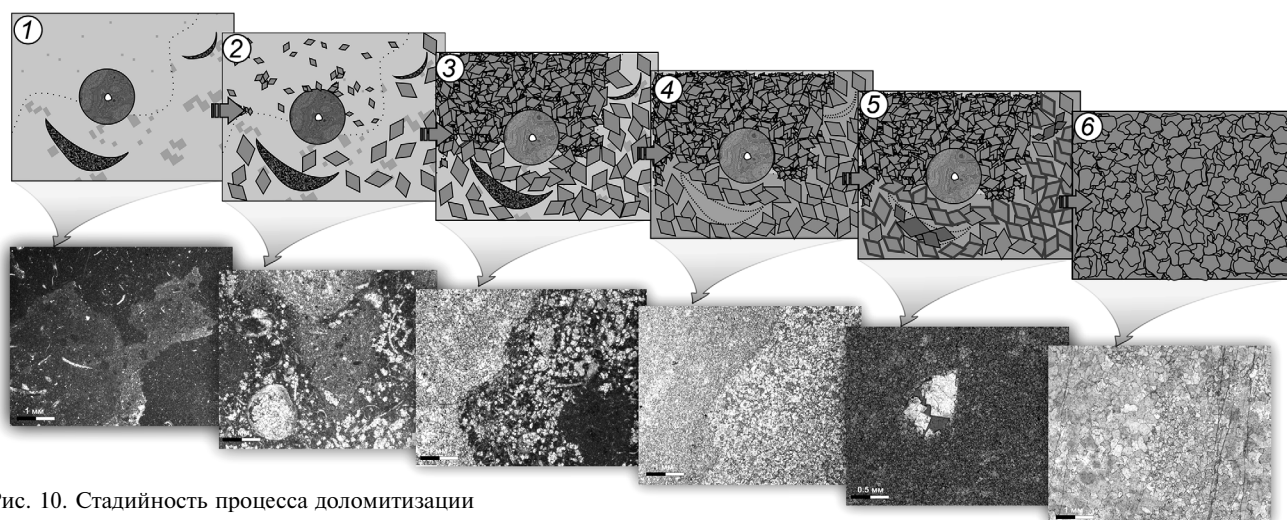
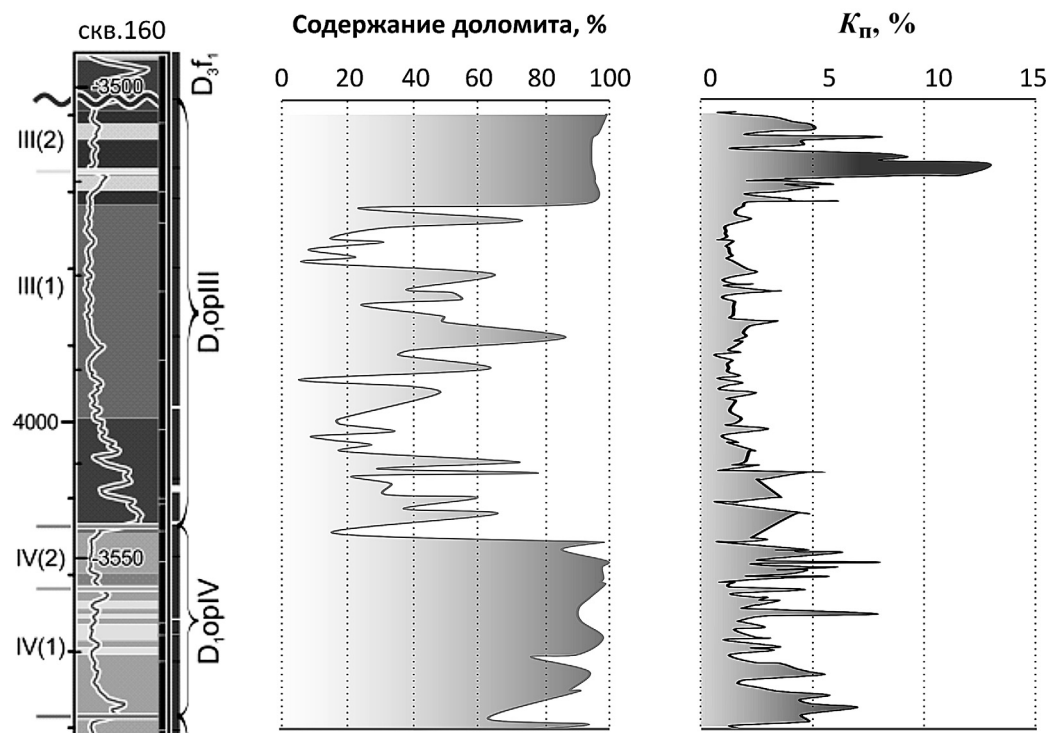


Рис. 10. Стадийность процесса доломитизации

более крупные, неплотно прилегающие один к другому кристаллы. Однако если в породе изначально порового пространства было недостаточно для свободного роста кристаллов, кристаллы новообразованного доломита начинали соприкасаться, мешали росту друг друга, между ними образовывались конформные контакты (стадии 1–3 на рис. 10). В доломитизированной породе, подверженной воздействию метеорных растворов, оставшийся между кристаллами доломита кальцит, а также незамещенные доломитом карбонатные зерна могут быть растворены, что способствует возникновению пустот выщелачивания (стадия 4 на рис. 10). В дальнейшем, если пористая порода не заполнится флюидом, вследствие дополнительного поступления в породу доломитизирующих растворов может произойти потеря пористости

в результате передоломитизации (стадии 5, 6 на рис. 10). Так, вследствие различных постседиментационных преобразований нижнедевонские карбонатные отложения обладают сложной конфигурацией пустотного пространства.

Заключение. Таким образом, в результате детального макро- и микроскопического изучения керна установлено, что накопление нижнедевонских отложений происходило в условиях мелководных сублиторалей и примыкающих к ним обширных приливно-отливных равнин. Для отложений каждой фациальной зоны на основе структурных характеристик выделены типы доломитов (идиоморфный, идиоморфный порфировый, идиоморфный, заполняющий пустоты, гипидиоморфный, ксеноморфный, «жильный»), установлена зависимость между выделенными

типами доломитовых структур, определяющими конфигурацию пустотного пространства, и первичной структурой карбонатной породы или осадка.

На качество доломитового коллектора влияют проницаемость, растворимость и первичная

структура карбонатной породы или осадка, а также объем доломитизирующих флюидов и продолжительность процесса доломитизации. Предфранский размыв, по всей видимости, не повлиял на степень доломитизации нижнедевонских отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безбородова И.В. Фациальные типы доломитов различного возраста // Эволюция карбонатного накопления в истории Земли. М.: Наука, 1988. С. 35–57.

Изучение и анализ ресурсной базы углеводородного сырья на территории Тимано-Печорской нефтегазовой провинции. Сыктывкар, Коми научный центр, 2005. 138 с.

Фридман Дж.М., Сендерс Дж.И. Генезис и распространение доломитов // Карбонатные породы. Генезис, распространение и классификация. Т. 1. М.: Мир, 1970. С. 249–319.

Gregg J.M., Sibley D.F. Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture // J. Sediment. Petrol. 1984. P. 908–931.

Поступила в редакцию 01.10.2019

Поступила с доработки 15.01.2020

Принята к публикации 15.01.2020