

## БИОГЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ДОЛОМИТОВ С АНОМАЛЬНО ВЫСОКОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

Г.А. Кринари\*, В.П. Морозов\*, Э.А. Королев\*, С.Н. Пикалев\*\*

\* *Казанский государственный университет, кафедра минералогии  
420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, КГУ, геофак*

*E-mail: krinari@kzn.ru*

\*\* *Татарско-Американская нефтяная компания АО «ТАТЕХ»  
423400, Татарстан, Альметьевск, ул. Маяковского, 116*

*E-mail: pikalev.sergey@tatex.ru*

*Поступила в редакцию 4 августа 2003 г.*

Среди органогенных известняков тульского горизонта в Татарстане иногда встречаются вторичные доломиты с аномальной, превышающей 30 %, пористостью. Их происхождение трактуется как результат совокупности процессов преимущественно биохимической природы. Подстилающие относительно проницаемые терригенные породы были обогащены растительным органическим веществом и начали генерировать метан уже на ранней стадии эпигенеза. При наличии слабо проницаемой покрышки в известняках сформировалась газовая шапка до появления углеводородов. Приход нефти сопровождался насыщением системы углекислотой, что приводило к увеличению порового объема за счёт частичного растворения и доломитизации кальцита. Периодические прорывы газовой смеси через покрышку обеспечивали пульсационный характер процесса заполнения нефтью вторичного коллектора, что сопровождалось неоднократным биохимическим разложением доломита и его перекристаллизацией с укрупнением зёрен. Промышленные скопления нефти в подобных объектах могут возникать только при выполнении всей совокупности условий, необходимых для реализации предлагаемого механизма.

Ключевые слова: *карбонатные породы, доломитизация, метан, нефтяные залежи, рентгенографический анализ, глинистые минералы.*

## BIOGENIC MECHANISMS OF FORMATION OF SECONDARY DOLOMITES WITH ANOMALOUSLY HIGH POROSITY

G.A. Krinari\*, V.P. Morozov\*, E.A. Korolev\*, S.N. Pikalev\*\*

\* *Kazan State University, Department of Mineralogy*

\*\* *Tatar-American Oil Corporation "TATEX"*

Among organogenous limestones of the Tula horizon in Tatarstan sometimes there are secondary dolomites from anomalous, exceeding 30 % porosity. Their origin is treated as result of set of processes of mainly biochemical nature. Underlying rather permeable terrigene sediments are enriched with vegetative organic substance and have begun to generate methane already at an early stage of a diagenesis. At presence poorly permeable tire covers in chalkstones the gaseous cap before occurrence of hydrocarbons was generated. Arrival of oil was accompanied by saturation of system by carbonic acid that resulted in increase of pore volume due to partial dissolution and dolomitisation of calcite. Periodic breaks of a gaseous mix through a tire cover provided pulsating character of process of filling with oil of a secondary collector that was accompanied by numerous biochemical decomposition of dolomite and him recrystallization with integration of grains. Industrial accumulations of oil in objects of similar type may arise only at performance of all set of the conditions necessary for realization of the offered mechanism.

Key words: *carbonate rocks, dolomitisation, methane, oil fields, X-Ray Diffraction, clay minerals.*

Нефтепромысловые объекты, связанные в пределах Южно-Татарского свода Татарстана с карбонатными породами тульского горизонта, обладают рядом характерных особенностей. Промышленно нефтеносными в них являются вторичные, крупнокристаллическизернистые, часто высокопористые доломиты, локализованные в виде маломощных зон среди органогенных известняков и терригенных пород. Карбонатная часть разреза тульского горизонта обычно именуется нефтяниками «тульским репером» или репером «тульский известняк», который хорошо выявляется по геофизическим данным и имеет региональное распространение. Отличительным признаком этого репера, позволяющим считать его и стратиграфическим [Губарева 1987; Ханин 1973; Чижова 1985], является черная окраска пород и относительно высокая выдержанность их литологического облика. Однако пространственная приуроченность областей нефтенасыщения в «тульском репере» не подчиняется простым геологическим закономерностям. В пределах одних площадей толща тульского горизонта содержит хорошие нефтенасыщенные коллекторы, в пределах других – нет, при относительной схожести их общих структурных планов. Для повышения эффективности поисков и разработки подобных нефтепромысловых объектов необходимо, прежде всего, установить механизмы и причины формирования вторичных доломитов с аномальной для всей толщи продуктивного карбона Татарстана структурой и пористостью, а так же выявить их связь с процессом нефтенакпления, что и является целью данной работы. Легко предположить, что аналогичные механизмы и типы коллекторов могут быть встречены и в других нефтегазоносных регионах.

#### **Объекты и методика исследований**

Объектом исследований служил керновый материал и данные ГИС по скважинам 11160, 11361, 11312 и 11507 Онбийской площади, где тульский горизонт часто является продуктивным. Площадь находится на северо-западном склоне Южно-Татарского свода, где нефтенакпления фиксируются как в карбонатной верхнетурнейской толще и перекрывающих её терригенных породах бобриковского горизонта визейского яруса, так и в карбонатных отложениях башкирского яруса. Для сравнения использовались аналогичные данные и по ряду

скважин Дёмкинской площади, расположенной в пределах восточного борта Мелекесской депрессии, где промышленные залежи в пределах тульского горизонта не фиксировались. Частота опробования изучаемых интервалов тульского и бобриковского горизонтов составляла 0,25–0,5 м, но не более 1 м, за исключением тех случаев, когда керн не удавалось поднять по техническим причинам. Как правило, петрографические шлифы и препараты для рентгенографических анализов готовились из одних и тех же образцов керна. Определение пористости и проницаемости проводилось по стандартизированным методикам.

Валовый минеральный состав проб осуществлялся методом рентгеновской дифрактометрии на порошковых препаратах, представлявших собой пасту из тщательно растёртых в этиленгликоле обломков породы, нанесённую на плоскую поверхность матового стекла. Диагностика типоморфных аутигенных минералов, которые часто присутствуют в концентрациях на полтора порядка ниже чувствительности стандартного рентгенографического анализа, обеспечивалась путём многократного накопления спектра в цифровом виде с последующей компьютерной обработкой. Съёмка осуществлялась в диапазоне межплоскостных расстояний от 50 до 2,48 Å для глинистых разностей пород, от 20 до 2,36 Å – для относительно чистых карбонатов и от 15 до 1,60 Å – для песчаников и алевролитов. Определение состава глинистой компоненты проводилось на ориентированных препаратах, приготовленных из фракции < 2,5 мкм, выделявшейся после растворения карбонатов путём отмучивания. Съёмка осуществлялась в воздушно-сухом состоянии препарата и при его насыщении этиленгликолем. При необходимости применялось и прокаливание при температуре 350°C. Все спектры регистрировались в линейной шкале модуля дифракционного вектора, имеющей размерность  $1/\text{Å}$  с шагом 0,0008  $1/\text{Å}$ .

#### **Литологический облик пород разреза и его генетическая интерпретация**

Нерасчлениваемая геологами-нефтяниками толща бобриковского и тульского горизонтов визейского яруса нижнего карбона представлена как терригенными, так и карбонатными породами, что отражает их полифациальную природу. На рисунке 1 приведён наиболее типич-

Рис. 1. Литологический разрез бобриковского и тульского горизонтов скважины Онбийская 11312.

ный разрез этих отложений на Онбийской площади по скважине 11312. Терригенные породы представлены песчаниками, алевролитами и аргиллитами черной окраски, которая обусловлена высоким содержанием в них нерастворимого органического углистого вещества, а так же иногда присутствием тонкодисперсного пирита, более крупные стяжения и кристаллы которого часто фиксируются здесь и микроскопически. Песчаники и алевролиты являются кварцевыми, в различной степени глинистыми, часто с кальцитовым цементом. Они формировались в пресноводных континентальных и субконтинентальных обстановках, сменившихся с началом тульской трансгрессии прибрежно-морскими и морскими условиями седиментации. Глинистые алевролиты и алевроитовые аргиллиты горизонта не обладают высокими экранирующими свойствами. Об этом свидетельствует постоянное присутствие в них маломощных (до 0,5 м) прослоев нефтенасыщенных песчаников, либо песчаников и алевролитов со следами нефти. В отличие от крупных песчаных тел русловых и дельтовых фаций, практического значения они не имеют.

В составе и структурно-текстурных особенностях карбонатной пачки тульского горизонта проявляется определенная вертикальная зональность, хотя и не имеющая четких границ. Нижняя её часть сложена кристаллическизернистыми плотными доломитами, обладающими черным цветом за счет присутствия битума, как в межзерновой области, так и в форме точечной вкрапленности в самих зернах (рис. 2а). Структура таких пород конформнозернистая, текстура – массивная, кристаллы доломита являются ксеноморфными. Размер зерен снизу вверх постепенно увеличивается, и мелкозернистая структура сменяется крупнозернистой. Пористость этих доломитов не превышает 5%, проницаемость почти отсутствует, а мощность довольно выдержана в пределах Онбийской

Возраст $C_1^{vиз}$	Глубина м	Литологическая колонка	Литологическая характеристика пород
Тульский горизонт	1153		Аргиллиты черные плотные
	1154		Доломиты черные, зернистые, слабо кавернозные. В верхней части пачки реликты темно-серых органогенно-хемогенных известняков. В средней части пачки 165 м - нефтенасыщенный вторичный доломит
	1155		
	1156		
	1157		
	1158		Аргиллиты черные, углистые, плотные
	1159		
Бобриковский горизонт	1160		Алевролиты черные, углисто-глинистые
	1161		Песчаники темно-коричневые. По всему интервалу прослой размером до 1,5 см и стяжения кальцита, кальцит и в цементе песчаников
	1162		
	1163		
	1164		Песчаники и аргиллиты в различной степени алевролитистые и песчанистые, черные, реже темно-серые, углисто-глинистые, плотные, со стяжениями пирита и прослоями известняка
	1165		
	1166		
	1167		
	1168		Песчаники и алевролиты черные, реже темно-серые, углисто-глинистые со стяжениями пирита и кальцита, слабо нефтенасыщенные
	1169		
1170		Аргиллиты в различной степени алевролитистые, черные, углисто-глинистые, плотные, со стяжениями пирита	

площади и составляет порядка 0,5 м. Среди них иногда встречаются реликты слабо нефтенасыщенных органогенных известняков, что однозначно указывает на исходно органогенную природу осадков. Следует отметить, что после экстракции вторичные доломиты сохраняют черную окраску, тогда как окраска реликтов первичного известняка становится желтовато-белой. В пределах рассматриваемой зоны, особенно в её верхней части, нередко встречаются выделения гипса и ангидрита размером до нескольких миллиметров. Причем в полиминеральных выделениях этих сульфатов центральные части сложены ангидритом, а периферийные – гипсом, что отражает последовательность их образования. Выше располагается непостоянная по мощности (от 1 до 1,5 м) и не вполне выдержанная даже в пределах Онбийской площади зона пористого крупнозернистого нефтенасыщенного доломита. Порода тоже сохраняет черный цвет после экстракции. Этот практически значимый и эксплуатируемый карбо-

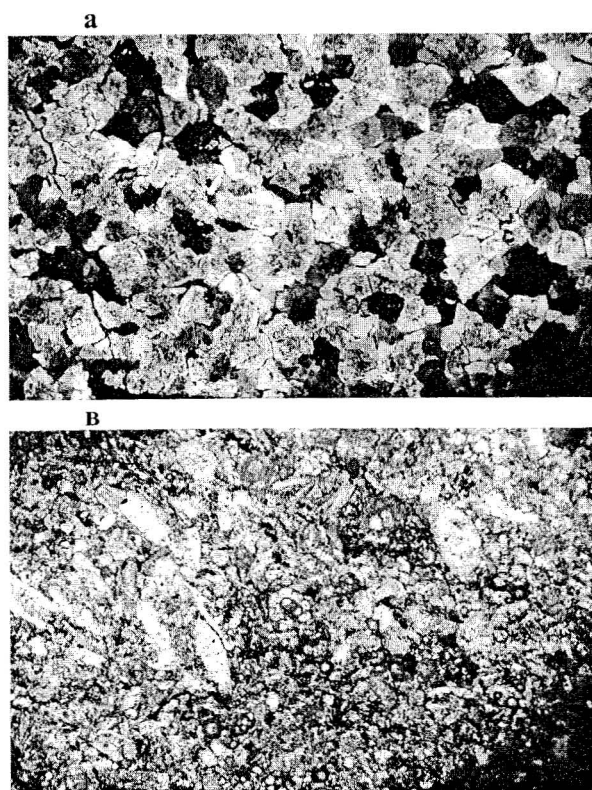


Рис. 2. Фотографии шлифов карбонатных пород тульского горизонта.

Никели скрещены. Увеличение 40.

а – плотный вторичный доломит с конформнозернистой структурой; б – высокопористый доломит с включениями битума в идиоморфных кристаллах; в – доломитизированный известняк с реликтами биоморфной структуры.

натный коллектор порового типа под микроскопом обнаруживает неконформнозернистую структуру и сложен идиоморфными, значительно реже – гипидиоморфными зернами доломита (рис. 2б), несущими точечную вкрапленность битума. Межзерновое пространство заполнено нефтью. Пористость породы достигает 10–15 %, проницаемость – более 300 мД. Здесь также наблюдаются реликты первично органогенных структур, а в одной из скважин (скв. 11160), в прикровельной части коллектора, и обильные выделения гипс-ангидритового состава. Именно в пределах этой зоны часто присутствуют интенсивно нефтенасыщенные и слабо сцементированные породы – «доломитовые пески». Такой коллектор представлен крупными, до 2,0 мм, идиоморфными и почти не соприкасающимися между собой кристаллами доломита, всё пространство между которыми заполнено нефтью. Изучение коллектора проводилось на образцах, полученных с помощью бокового сверлящего грунтоноса, так как в процессе отбора керна снарядом «Недра» поднять «доломитовый песок» не удаётся. Определённая прямым методом пористость таких образцов достигает величины 34 % и более. По данным акустического каротажа, пористость соответ-

ствующих интервалов составляет примерно 30 %, но интерпретация стандартных методов ГИС (НГК, ГК, ПС, МК) даёт значения, не превышающие 9 %. Еще выше по разрезу наблюдается закономерный плавный переход доломитов к доломитизированным лишь частично органогенным известнякам (рис. 2в) с пятнисто-линзовидной и полосчатой текстурой, и далее к органогенным известнякам. Нефтенасыщенность доломитизированных известняков слабая, неравномерно пятнистая и пятнисто-линзовидная, практически незначимая. Включения битума в доломитовых кристаллах отсутствуют. Светло-серые, до желтовато-белых, органогенные известняки не обладают нефтенасыщенностью. Органические остатки, как тех, так и других пород, характеризуются хорошей степенью сохранности, тогда как изначально пелитоморфный кальцит цемента полностью перекристаллизован и обладает вторичной неравномернозернистой, преимущественно мелко-среднезернистой структурой. Карбонатные породы перекрываются слабо алевритистыми аржиллитами, знаменующими начало новой регрессии, которая в ряде случаев приводила к частичному размыву верхней части отложений тульского горизонта.

**Минеральный состав и генетическая интерпретация глинистой компоненты пород**

Минеральный состав глинистой компоненты пород терригенной толщи подчиняется строгому фациальному контролю. Континентальные и субконтинентальные отложения бобриковского возраста чётко фиксируются по появлению каолинита в качестве основного глинистого минерала. Морские или прибрежно-морские аргиллиты, перекрывающие карбонатную пачку тульского горизонта, имеют во всех изученных разрезах, где они были представлены керном, постоянный и типичный для всей остальной толщи продуктивного карбона, не изменённый процессами нефтенакопления, иллит-хлоритовый состав при невысоком содержании каолинита и смешанослойных иллит-сметитовых фаз. Наличие местами последующего размыва на их минеральный состав не влияет.

Наличие миграции флюидов, связанных с присутствием нефти через пачку аргиллитов и глинистых алевролитов, подстилающих породы тульского горизонта подтверждается специфическими изменениями их минерального состава. Биохимические процессы, начинающиеся с приходом в пласт углеводородов, сопровождаются полным или почти полным разложением многих алюмосиликатов с переходом  $Al^{3+}$  и  $Si^{4+}$  в раствор [Сахибгареев 1989]. Взаимодействие такого раствора с глинистой компонентой приводит прежде всего к преобразованию триоктаэдрического хлорита в смешанослойную ди-триоктаэдрическую вермикулит-хлоритовую фазу, близкую тосудиту, с одновременным переходом смектитовой составляющей в диоктаэдрический вермикулит. Затем начинается трансформация иллитовых и иллит-сметитовых структур в близкую к упорядоченной смешанослойную фазу иллит-диоктаэдрический вермикулит. Наличие диоктаэдритизации подтверждается исчезновением на дифракционных спектрах отражений 060 с межплоскостными расстояниями, превышающими  $1,502 \text{ \AA}$ , а формирование «гидраргиллитовых» межслоёв – отсутствием полного сжатия пакетов при прокаливании до  $350^\circ\text{C}$ . Детальный анализ подобных структурных преобразований, включая сопоставление экспериментальных дифракционных спектров с теоретическими, приведён в предыдущей публикации [Ахмеров и др., 2001].

На рисунке 3 (3а – воздушно сухое состояние, 3б – насыщение этиленгликолем) приведена серия дифракционных картин базальных отражений глинистой составляющей пород бобриковского и тульского горизонтов скважины 11312, иллюстрирующая изменение по разрезу интенсивности и механизмов биогенных преобразований. Два нижних спектра соответствуют отложениям бобриковского возраста, а два верхних – тульским аргиллитам, подстилающим и перекрывающим продуктивную карбонатную толщу. Видно, что аргиллиты, подстилающие эту толщу (глубина 1157,5 м), несут более слабые, по сравнению с бобриковскими, следы сквозной миграции флюидов, а аргиллиты в кровле тульского горизонта имеют минеральный состав, не изменённый воздействием углеводородов.

**Механизм доломитизации с образованием аномально высокой пористости**

На основании приведённых данных, могут быть сформулированы некоторые общие генетические выводы. Очевидно, что доломиты тульского возраста являются вторичными, сформировавшимися за счёт метасоматического замещения первично органогенных известняков. Об этом свидетельствуют реликты органогенного известняка среди доломитов, присутствие в последних реликтов органогенной структуры, а также положение этих пород в разрезе. На сопредельных площадях, где аналогичные известняки не подвергались доломитизации, в них фиксируется достаточно представительная морская фауна, включая одиночные кораллы. Таким образом, любые седиментационные или диагенетические механизмы доломитизации [Холодов, 1988] исключаются полностью – исходные породы находились на значительном удалении от береговой линии, а фиксирующийся иногда размыв их кровли нигде не сопровождался доломитизацией. Метасоматический процесс характеризуется вполне определенной направленностью: снизу вверх плотные зернистые доломиты постепенно сменяются пористыми крупнозернистыми, затем доломитизированными органогенными известняками и далее – собственно органогенными известняками. Поскольку общее содержание доломита повышается сверху вниз, основной источник метасоматоза следует искать в терригенных породах, подстилающих карбонатную пачку. Главной причиной доломитизации карбонатных

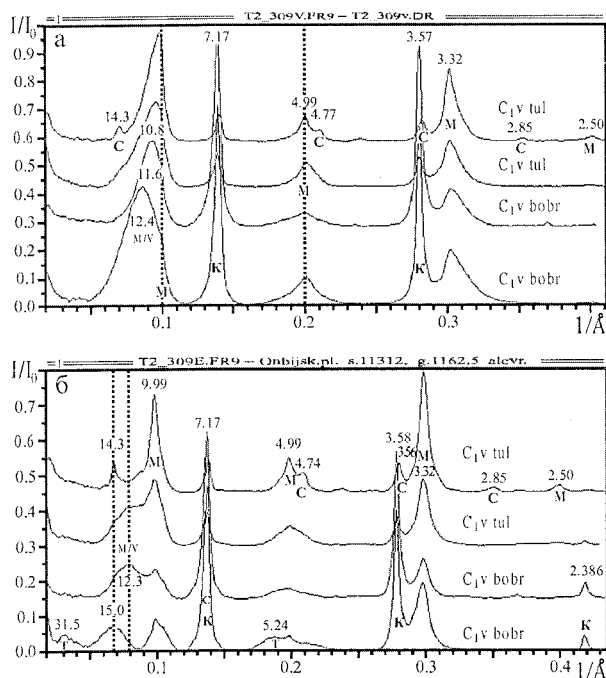


Рис. 3. Преобразования глинистой компоненты аргиллитов тульского и бобриковского горизонтов, характеризующие их проницаемость нефтяными флюидами.

Съёмка в воздушно-сухом состоянии (а) и при насыщении этиленгликолем (б). Обозначения: М – слюда, С – хлорит триоктаэдрический, К – каолинит, Т – тосудит, М/В – упорядоченно смешанослойная фаза слюда–вермикулит диоктаэдрический.

толщ является такое повышение парциального давления углекислого газа, при котором, как следует из работ [Нечипоренко, Бондаренко 1988; Деггенс 1967; Холодов 1983], доломит становится менее растворимым, чем кальцит. Широко развитая в пределах всех продуктивных толщ генерация углекислого газа обычно связана с химическим либо, в большей степени, биохимическим окислением углеводородов [Бутурлин и др. 1991]. Ещё одним источником  $\text{CO}_2$  мог быть биогенный углерод [Леин и др., 1989; Suess et al., 1998], которым обогащены терригенные породы бобриковского возраста. Благодаря отсутствию непроницаемой перемычки, углекислота могла мигрировать из проницаемых терригенных пород и в перекрывающую карбонатную толщу ещё до прихода в неё нефти. Но заключительные фазы процесса формирования вторичных доломитов совпадали по времени, либо даже реализовались несколько позже прихода водонефтяных флюидов в карбонатную часть разреза, что однозначно подтверждается наличием в их зернах вкраплений битума. Последние, несомненно, были захвачены растущими кристаллами доломита. При этом, скорее всего, основным источником углекислоты становится биохимическое окисление нефти в пределах самого «тульского репера». Косвенным подтверждением тому служит последовательность формирования гипс-ангидритовых включений. Сам факт образования этих минералов в ходе доломитизации является вполне очевидным, по-

скольку процесс сопровождается относительным обогащением системы кальцием. Но, как следует из взаимоотношения этих минералов в породе, первоначально идёт кристаллизация ангидрита, а не гипса, что указывает на довольно высокую во время синтеза, превосходящую  $55^\circ\text{C}$ , с учётом давления, температуру пласта [Минералы ..., 1974]. Поскольку это не региональное явление (современные температуры отложений визейского яруса не превышают  $30^\circ\text{C}$ ), то проще всего оно объясняется экзотермичностью реакций, ответственных за биохимические преобразования углеводородов в относительно замкнутых системах. Появления сульфатов, не проявляющих подобной последовательности, отмечается в пределах всей продуктивной толщи карбона, чаще всего – в краевых зонах частично разрушенных залежей, что предложено рассматривать как результат гидропрорыва пластов внешними водами с иными гидрохимическими параметрами [Карнюшина и др., 1999; Ахмеров и др., 2001].

Другим необходимым фактором эпигенетической доломитизации является возможность постоянного или периодического поступления в зону реакции  $\text{Mg}^{2+}$  при выполнении определённого соотношения между общей солёностью вод и магнием [Нечипоренко, Бондаренко 1988]. Концентрация последнего в пластовых водах могла стать достаточно высокой в пермское время, поскольку отложения карбона здесь перекрываются эвапоритовой толщей нижней перми, где гипс и ангидрит являются породообразующими минералами. Поступление  $\text{Mg}^{2+}$  в реакционный объём, кроме разрывных нарушений в краевых частях свода, обеспечивалось самими органогенными известняками, которые обладали относительно высокой исходной проницаемостью. Плотные доломиты, локализован-



ные в основании карбонатной пачки, несомненно формировались с привнесением вещества. Наличие у них конформнозернистой структуры и отсутствие вторичной пористости, которая всегда появляется при изобъемной доломитизации [Бутурлин и др. 1991], указывает на увеличение объёма твёрдой фазы в ходе самой перекристаллизации.

Изложенные генетические представления вполне совпадают с традиционными, которые подробно рассмотрены в обобщении В.Н. Холодова [Холодов, 1988], но не раскрывают механизма тех процессов, которые сформировали породу со специфичной структурой и аномально высокой для километровой глубины пористостью. Необходимо объяснить, почему стимулируемый окислением углеводородов процесс доломитизации, имеющий в продуктивных горизонтах карбонатных толщ региональный характер, идёт в данном случае до образования «доломитовых песков». Их общая пористость намного превосходит те 14 % плюс пористость исходных органогенных известняков ( $\approx 8-10\%$ ), объясняемые полной изобъемной доломитизацией, а рост кристаллов доломита явно происходил в относительно свободном объёме. Очевидно, что образование дефицита объёма твёрдой фазы в центральной части пачки компенсировалось избытком объёма в её нижней части, но ни один из предложенных ранее механизмов доломитизации подобного перераспределения вещества в пределах относительно замкнутой системы не предусматривает, как и не объясняет причин появления и сохранения таких пластовых давлений, которые предохраняли породу от последующего уплотнения. Это давление могло создаваться только газом, но не  $\text{CO}_2$ , рост давления которого в «свободном» объёме компенсировался бы уменьшением объёма твёрдой фазы – вплоть до полной перекристаллизации кальцита, т.е. до завершения метасоматического процесса. Ни формирования идиоморфных кристаллов, ни появления аномальной пористости было бы тогда невозможным. Из положения объекта в разрезе визейского яруса легко предположить, что важную роль в его формировании играют подстилающие терригенные отложения, содержащие растительную органику, а иногда и довольно мощные пласты каменного угля [Gafurov & Khasanov, 2001]. Все феномены, на наш взгляд, находят простое объяснение, если учесть, что в осадках, обогащённых органическим веществом на основе целлюло-

зы, обычно реализуется биохимический синтез метана и его миграция в вышележащие отложения. Процесс начинается на самых начальных стадиях эпигенеза, поэтому, ещё задолго до прихода нефти, в пористых органогенных известняках тульского горизонта сформировалась метановая газовая шапка, давление в которой намного превышало горное. С появлением углеводородов, состав анаэробной микрофлоры менялся, но не одновременно во всём объёме бобриковского горизонта – более проницаемые песчано-алевритовые слои, заполняясь нефтью, начинали продуцировать  $\text{CO}_2$ , в то время как менее проницаемые глинистые разности продолжали генерировать метан. Такое разделение является в известной мере условным, поскольку дополнительным источником  $\text{CO}_2$  был, скорее всего, и сам метан. Установлено, что в подобных ситуациях возникает сообщество микроорганизмов, включающее метаногены и сульфатредукторы. Первые способны окислять  $\text{CH}_4$  с образованием молекулярного водорода, который, в свою очередь, создаёт хорошие условия для интенсивного развития вторых [Hoehler et al., 1994]. Итогом жизнедеятельности такого сообщества становится обогащение системы  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  [Леин и др., 2000], что в данном случае подтверждается интенсивной пиритизацией. Другим следствием названного процесса является перекристаллизация и пространственное перераспределение кальцита в известковистых алевролитах и песчаниках бобриковского горизонта за счёт возникновения локальных градиентов pH. Синтез метана связывает водород воды, что сопровождается относительным обогащением системы группами  $(\text{OH})^-$ , т.е. к увеличению pH. Очевидно, могли реализоваться и другие химические или биохимические реакции, приводящие к аналогичному результату [Молчанов 1981], поскольку состав добываемых нефтей обычно обогащён водородом по отношению к предполагаемому исходным органическому веществу. Подтверждением наличия процессов подобного рода служит иллюстрируемое рисунком 4 обнаружение в одном из образцов бобриковского глинистого алевролита малой примеси брусита –  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , образование которого требует очень высоких значений pH. Вполне вероятно, что примесь этого минерала присутствует и в других местах разреза, но, обладая высокой симметрией, брусит содержит в реально идентифицируемой области дифракционного спектра только три интенсивных

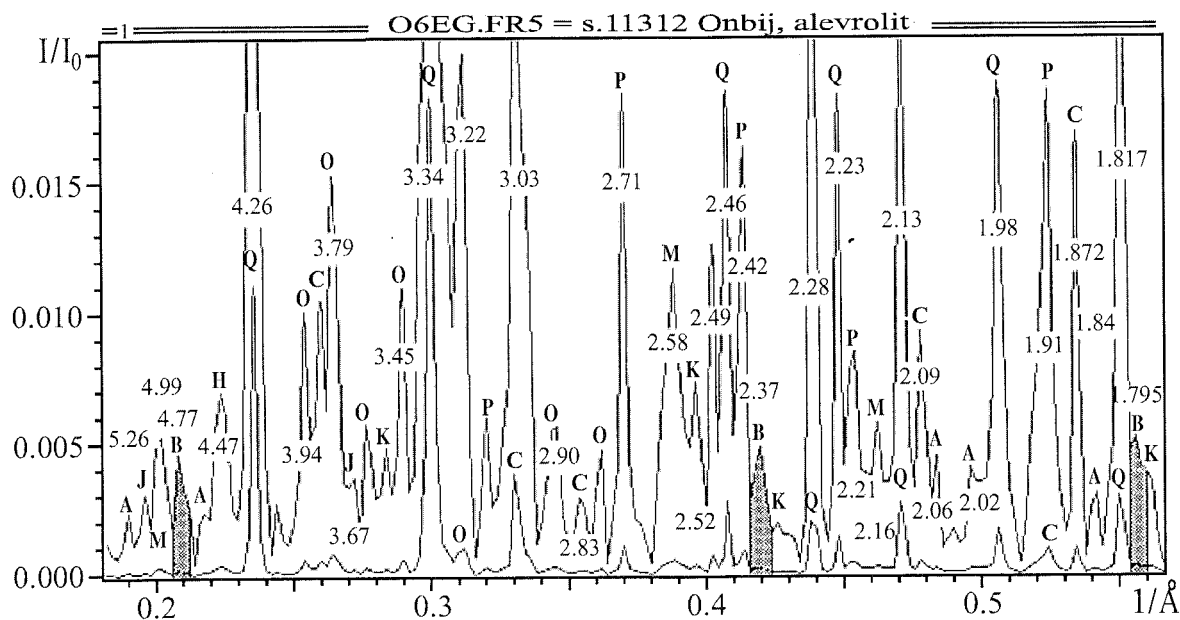


Рис. 4. Появление брусита в алевролите бобриковского горизонта.

Обозначения: Q – кварц, O – ортоклаз, C – кальцит, P – пирит, K – каолинит, J – ярозит, A – базальюминит, M – слюда, B – брусит (отражения выделены штриховкой).

рефлекса, которые часто перекрываются отражениями других кристаллических фаз. Поскольку синтез метана мог проходить преимущественно в терригенной части продуктивной толщи, а синтез  $\text{CO}_2$  – как в терригенной, так и в карбонатной, выравнивание локальных градиентов рН привело в конечном счёте к формированию единого геохимического барьера, совпадающего с подошвой карбонатной толщи. Действительно, выше этой литологическая граница фиксируется только доломит, а ниже – только кальцит.

Наличие в пористых органогенных известняках тульского горизонта метана в виде газовой шапки радикальным образом повлияло на всё формирование залежи. В течение достаточно длительного времени дополнительные порции химически инертного метана и нефтяного газа, а так же насыщенная углекислотой вода и нефть, уже лишившаяся части своих наиболее лёгких компонентов за счёт биохимических процессов, совместно проникали в карбонатную толщу через слабо, но всё же проницаемые породы в кровле терригенной пачки. Реакционная зона доломитизации, содержащая и воду и нефть, в целом очень медленно смещалась снизу вверх, синхронно с частичным удалением газовой фазы через почти непроницаемую по-

крышку аргиллитов в кровле тульских отложений. Вместе с метаном система теряла и часть лёгких углеводородов, что приводило к дальнейшему утяжелению нефти и увеличению её вязкости. Процесс, очевидно, носил пульсационный характер, поскольку прорыв газа через аргиллиты обычно осуществляется по системе субпараллельных вертикальных и горизонтальных трещин, быстро захлопывающихся при частичном снятии давления и залечивающихся аутигенными минералами. Граница между жидкой и газовой фазой иногда двигалась не только вверх, но и вниз – до очередного прорыва газовой шапки. В результате под её нижней границей происходило обогащение раствора продуктами разложения кальцита. Поэтому в нижней части карбонатной толщи, где постоянно пополнялась и концентрация магния, объём новообразованной кристаллической фазы превышал объём исходной. Флюид, заполняющий уменьшающиеся по размеру поры, при наличии газовой шапки, мог выдавливаться вверх. Как следствие, формировался плотный слабо проницаемый доломит с конформнозернистой структурой. Напротив, при очередном смещении реакционного фронта вверх, доломитизация подвергался известняк, пористость которого уже была существенно выше исходной за счёт



предварительного растворения. Она увеличивалась ещё на 14 % за счёт разности в кристаллической плотности известняка и доломита [Бутурлин и др., 1991]. Большой свободный объём пор обеспечивал рост идиоморфных кристаллов и образование породы с неконформнозернистой структурой. Избыток кальция и повышенная температура реакционной зоны, сохранявшаяся присутствием газовой шапки, приводили к синтезу ангидрита, частично замещённого потом гипсом. Скорее всего, большая часть новообразованного доломита подвергалась неоднократному частичному растворению и перекристаллизации, поскольку в реакционной зоне ВНК формирующейся нефтяной залежи, которая так же должна была испытывать разнонаправленные перемещения, биохимическая растворимость доломита выше, чем у кальцита [Сахибгареев, 1989]. Подтверждением тому служат обильные включения битума внутри самих доломитовых кристаллов и их ярко выраженное зональное строение (рис. 2б). Низкая результирующая скорость движения реакционного фронта и многократная перекристаллизация самого вторичного доломита объясняет аномально высокие размеры его идиоморфных кристаллов.

Затухание доломитизации, связанное с истощением количества участвующих в ней реагентов и снижением проницаемости основания карбонатной пачки, происходило плавно, но с сохранением общей динамики процесса. Это выразилось в формировании пятнисто-линзовидной и полосчатой текстур частично доломитизированных органогенных известняков в верхней части толщи, их постепенном переходе в чистые известняки с перекристаллизацией только пелитоморфного кальцита. Наличие в исходной породе менее проницаемых участков, либо, скорее всего, образование в ней газовых пузырей приводило к появлению среди чистых кристаллически-зернистых доломитов включений, сохранивших кальцитовый состав или следы биогенной структуры. Наличие газовой шапки и относительно высокая гидродинамическая изолированность системы обеспечивали превышение пластового давления над горным в течение всего времени формирования залежи. Это предотвратило уплотнение пород в наиболее продуктивной центральной части карбонатной толщи и затронуло только её нижнюю часть. После завершения процесса формирования коллектора, уплотнению препятствовало заполнение всего свободного порового объёма нефтью.

Совокупность всех названных факторов и явлений полностью объясняет, на наш взгляд, специфику формирования коллекторов и залежей нефти в карбонатной толще тульского горизонта Татарстана. Вполне вероятно, что аналогичные объекты могли возникать и в других местах при реализации полного комплекса перечисленных процессов.

### Заключение

Из всего изложенного следует, что формирование аномальных по структуре и высокой пористости эпигенетических доломитов, способных давать, несмотря на малую мощность, существенные промышленные притоки нефти, возможно только при выполнении ряда необходимых условий:

1. Локализации относительно проницаемых органогенных известняков между подстилающими слабо проницаемыми и перекрывающими фактически непроницаемыми терригенными породами.

2. Сохранении высокого парциального давления углекислого газа биогенной природы в водонефтяном флюиде, формирующем нефтяную залежь.

3. Наличии в достаточном количестве ионов магния и, что не менее важно, возможности восполнения его концентрации в ходе всего процесса доломитизации.

4. Присутствию в основании продуктивного разреза терригенных отложений континентальных или субконтинентальных фаций, обогащённых растительной органикой, что обеспечивает биохимическую генерацию и поступление в проницаемую вышележащую толщу метана с образованием в ней газовой шапки ещё до начала формирования нефтяной залежи.

5. Относительно высокую степень гидродинамической изолированности системы, обеспечивающую, за счёт газовой шапки, сохранение пластового давления, превышающего горное, в течение всего процесса формирования нефтяной залежи.

Очевидно, что выполнение всех перечисленных условий представляет собой достаточно редкое явление, поэтому вероятность обнаружения промысловых объектов типа «тульского репера» при менее высокой литологической и фациальной неоднородности продуктивной толщи в целом невелика. Этим, скорее всего, объясняется отсутствие подобных коллекторов

нефти на других стратиграфических уровнях и в тульских отложениях многих других площадей, включая Дёмкинскую. Последняя расположена в краевой части Мелекесской депрессии, где в осадочном чехле фиксируются разрывные нарушения, снижающие возможность длительного сохранения изолированных, в гидродинамическом смысле, систем.

### Список литературы

- Ахметов Н.З., Бахтин А.И., Васильева Т.Л. и др.* Возможности предварительной оценки продуктивных карбонатных коллекторов по литолого-минералогическим данным // Георесурсы. 2001. № 4 [5]. С. 4–12.
- Багринцева К.И.* Карбонатные породы – коллекторы нефти и газа. М.: Недра, 1977. 231 с.
- Бутурлин Ю.К., Конюхов А.И., Карнюшина Е.Е.* Литология нефтегазоносных толщ. М.: Недра, 1991. 268 с.
- Губарева В.С.* Волго-Уральская нефтегазоносная провинция // Справочник по стратиграфии нефтегазоносных провинций СССР. М.: Недра, 1987. С. 25–54.
- Деггенс Э.* Геохимия осадочных образований. М.: Мир, 1967. 300 с.
- Карнюшина Е.Е., Левченко В.А., Серпикова В.М.* Влияние стадийных и наложенных процессов на изменение карбонатных пород нефтяного месторождения Кожасай (Прикаспий) // Вестник МГУ. 1999. Сер. 4. Геология. № 3. С. 29–35.
- Лейн А.Ю., Гальченко В.Ф., Покровский Б.Г.* Морские карбонатные конкреции как результат процесса микробного окисления газгидратного метана в Охотском море // Геохимия. 1989. № 10. С. 1396–1406.
- Лейн А.Ю., Горшков А.И., Пименов Н.В. и др.* Аутигенные карбонаты на метановых сипах в Норвежском море: минералогия, геохимия, генезис // Литология и полез. ископаемые. 2000. № 4. С. 339–354.
- Мильнер Г.Б.* Петрография осадочных пород. М.: Недра, 1968. Т. 1. 500 с. Т. 2. 666 с.
- Минералы.* Справочник. Диаграммы фазовых равновесий. Вып. 1. Фазовые равновесия, важные для природного минералообразования. М.: Наука, 1974. 987 с.
- Молчанов В.И.* Генерация водорода в литогенезе. Новосибирск: Наука, 1981. 142 с.
- Нечипоренко Г.О., Бондаренко Г.П.* Условия образования морских карбонатов. М.: Наука, 1988. 133 с.
- Сахибгареев Р.С.* Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. Л.: Недра, 1989. 260 с.
- Ханин А.А.* Породы – коллектора нефти и газа нефтегазоносных провинций СССР. М.: Недра, 1973. 304 с.
- Холодов В.Н.* Постседиментационные преобразования в элизионных бассейнах. М.: Наука, 1983. 152 с.
- Холодов В.Н.* Проблемы доломитообразования на современном уровне развития литологии // Эволюция карбонатонакопления в истории Земли. М.: Наука, 1988. С. 3–23.
- Чиждова В.А.* Опорные геологические разрезы нефтегазоносных провинций европейской части СССР. М.: Недра, 1985. 268 с.
- Gafurov Sh.Z., Khasanov R.R.* The Kama Coal Basin // Georesources. 2001. № 2 (5). P. 22–26.
- Hoehler T. M., Alperin M. J., Albert D.B. et al.* Field and laboratory studies of methane oxidation in an anoxic marine sediments: evidence for a methanogen-sulfate reducer consortium // Global Geochem. Cyclic. 1994. V. 8. № 4. P. 451–463.
- Suess E., Bohrman G., Linke P. et al.* Gas hydrates and fluid venting from the Cascadia accretionary margin. EOS Transactions of the American Geophysical Union Supplement. 1998. V. 77. P. 321–323.

Рецензент доктор геол.-мин. наук В.Н. Холодов