

УДК 551

ЭВОЛЮЦИЯ ПРОЦЕССОВ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОДАХ РАННЕГО ВЕНДА НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

© 2019 г. А. В. Постников, О. В. Постникова, Е. С. Изъюрова*,
В. В. Пошибаев, А. С. Кузнецов, А. Д. Изъюров, А. Е. Козионов

*Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
119991 Москва, Ленинский проспект, 65*

**E-mail: ekonovalceva@yandex.ru*

Поступила в редакцию 24.05.2017 г.

В статье показаны основные закономерности проявлений эпигенетических процессов в нижневендских терригенных отложениях Непско-Ботуобинской антеклизы. Эволюция процессов минералообразования выражена в смене минеральных парагенезов, сформировавшихся на стадиях регионального фонового (стадиального) литогенеза погружения – диагенеза, раннего и позднего катагенеза, а также вследствие сложного сочетания локальных наложенных типов литогенеза – катакластического, гидротермально-метасоматического и динамотермальной активации. Локальные наложенные процессы могли сопровождать эпоху траппового магматизма пермо-триасового возраста. Высокая степень преобразованности пород терригенного комплекса раннего венда Непско-Ботуобинской антеклизы определяет специфику их структуры, состава и физических свойств, которые необходимо учитывать в процессе геологоразведочных работ, направленных на поиски месторождений различных полезных ископаемых.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Непско-Ботуобинская антеклиза, терригенные отложения, венд, катагенез, минералогия

DOI: 10.31857/S0024-497X2019131-43

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Отложения раннего венда (непской и паршинской свит) [Решения..., 2012] Непско-Ботуобинской антеклизы (НБА) отличает широкое разнообразие литотипов. Для них характерен богатый комплекс минералов, включающий типичные для осадочных терригенных пород, а также минералы, формирующиеся в результате многостадийной эволюции разнообразных процессов минералообразования. Многостадийность минералообразования, в целом, характерна для пород осадочного чехла Сибирской платформы и во многом определяет специфику его строения, состава и физических свойств, а также распределения в нем твердых и горючих полезных ископаемых [Гурова, Чернова, 1988; Жарков, 1974; Жуковская, 2011; Копелиович, 1965; Пиннекер, 1966; Юдович, Кетрис, 2008].

Целью настоящей работы явилось выявление и характеристика эпигенетических процессов и парагенезов аутигенных минералов пород терригенного комплекса раннего венда Непско-Ботуобинской антеклизы.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В течение нескольких последних десятилетий на кафедре литологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина при исследовании терригенных природных резервуаров нижнего венда НБА был изучен керновый материал из 53 скважин глубокого бурения, а также проведены разномасштабные литологические исследования по 4350 образцам из разрезов скважин Аянского, Ярактинского, Непского, Кийского, Дулисьменского, Верхнечонского, Могдинского, Чаяндинского, Среднеботуобинского месторождений. Образцы изучались с помощью оптической микроскопии в обычных и прокрашенных шлифах, а также в шлифах, изготовленных на безводной основе, на поляризационном микроскопе Axio Imager A2m Carl Zeiss, с помощью электронной микроскопии, на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV (РЭМ) с приставкой для микроанализа OXFORD INSTRUMENTS IE350-IW500-HKL, и рентгеноструктурного анализа (PCA), на рентгеновском дифрактометре RIGAKU (XRD) SmartLab.

ОБОБЩЕННАЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Нижневендские отложения НБА представлены широким комплексом терригенных пород, включающим конгломераты; гравелиты мелкообломочные песчаные; песчаники крупно-, средне- и мелкозернистые; песчаники разнотернистые гравелитистые; алевролиты; песчано-глинистые брекчии; аргиллиты песчано-алевритистые. Между выделенными литотипами существуют переходные разности.

В процессе исследований выявлено, что обломочная часть терригенных отложений венда преимущественно сложена кварцем на 70–75%, полевыми шпатами на 5–10% и обломками кислых магматических горных пород (5–10%). В разных процентных соотношениях встречаются преобразованные обломки вулканокластиков, глинистых сланцев, кремнистых и карбонатных пород. В породах отмечаются такие акцессорные минералы как монацит, циркон, турмалин, сфен, рутил, лейкоксен и др. В ряде разрезов НБА в грубообломочных отложениях количество зерен монацита может достигать 30% объема породы (рис. 1а). Цементирующая масса песчаников и гравелитов составляет от единиц до 25–30% объема породы и представлена широким комплексом минералов. В цементе пород присутствует глинистая составляющая, карбонатная, сульфатная, галитовая, кварцевая в различных процентных соотношениях. Общей характеристикой нижневендских терригенных отложений является их высокая степень вторичной преобразованности [Осадочные бассейны..., 2004; Шеин, 2007].

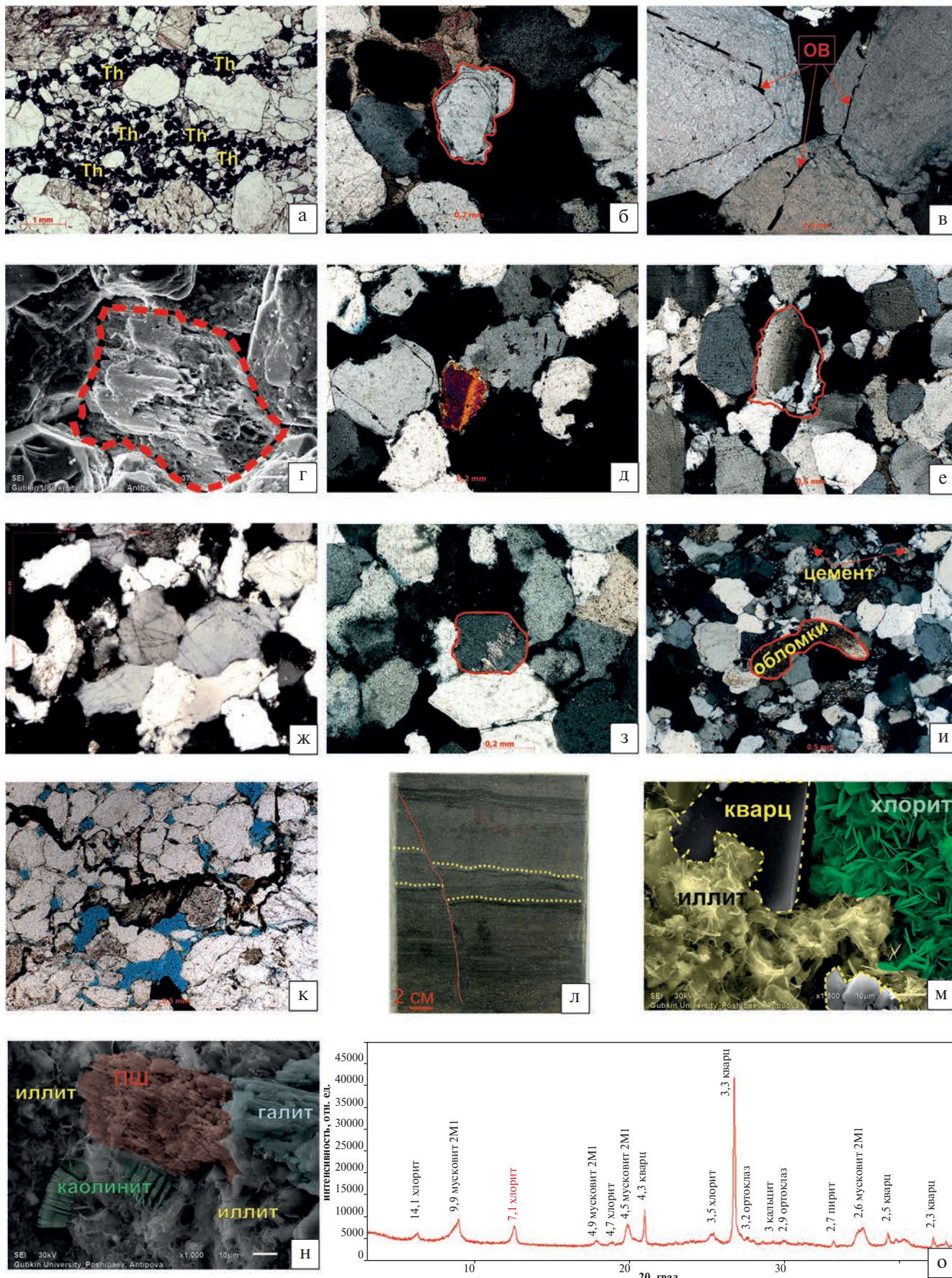
1. ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

1.1. Регенерация зерен

Одним из главных эпигенетических процессов, широко распространенных в нижневендских терригенных отложениях НБА, является регенерация зерен кварца, которая была массовой и многостадийной. Встречаются зерна с каемками до 5 генераций (см. рис. 1б). В ряде разрезов скважин встречаются зоны, где регенерация зерен кварца в значительной степени изменяет структуру породы и, достигая своего максимума, закрывает первичное поровое пространство, образуя «сливные» песчаники. Размер зерен, наиболее затронутых процессом регенерации, составляет 0.25–0.5 мм. Толщина каемки может достигать 0.25 мм. Между каемками регенерации и зерном часто наблюдается «зажатое» глинисто-органическое вещество, которое отчетливо фиксируется под микроскопом (см. рис. 1в).

В отдельных интервалах разреза широко распространены процессы регенерации зерен калиевых полевых шпатов (КПШ). Размер зерен КПШ, наиболее затронутых процессом регенерации, составляет 0.5–1 мм. Вслед за регенерацией зерна КПШ в значительной степени подверглись процессам пелитизации и последующего выщелачивания (см. рис. 1г). Полевые шпаты, чаще всего щелочные, слагающие регенерационную кайму, наследуют минералогический состав материнского зерна (калишпаты и альбит), и, как следствие, оптическую ориентировку и спайность. В тоже время в ряде разрезов могут встречаться каемки регенерации, отличные по составу

Рис. 1. Минеральные и структурные характеристики пород раннего венда НБА: а – россыпи монацита составляют 25–30% объема породы в гравелите мелкообломочном (николи скрещены, увеличение 25); б – красным выделено зерно кварца с 5 каемками регенерации в песчанике крупно-среднезернистом (николи скрещены, увеличение 100); в – зажатое глинисто-органическое вещество между зернами кварца и каемками регенерации (николи скрещены, увеличение 100); г – красным выделено выщелоченное зерно микроклина (РЭМ, увеличение 370); д – в центре фото яркое зерно турмалина, регенерационная кайма (толщина каймы 0,11 мм) которого вклинивается в регенерационную каемку кварца в песчанике крупнозернистом (николи скрещены, увеличение 100); е – красным выделено зерно кварца с гранобластовой структурой, которая затронула каемку регенерации в песчанике крупнозернистом (николи скрещены, увеличение 100); ж – сдавленные и потрескавшиеся зерна кварца в песчанике крупнозернистом (николи скрещены, увеличение 100); з – красным выделены шиповидные структуры вставания слюды и хлоритов в кварцевые зерна (николи скрещены, увеличение 200); и – красным выделены единичные окатанные обломки глинистых пород и глинистый цемент, образованный за счет механической деформации глинистых обломков в песчанике среднезернистом (николи скрещены, увеличение 100); к – микростилолитовый шов по напластованию пород, заполненный глинисто-органическим веществом, со сдавленными и деформированными глинистыми обломками и пластинками слюды (синим цветом окрашено пустотное пространство песчаника крупно-среднезернистого) (николи параллельны, увеличение 100); л – нижневендские песчаники со структурами сдвигов по субвертикальной трещине раскрытостью 1–2 мм; м – волосяной иллит и листоватый хлорит в виде чешуйчатой и тонкопластинчатой массы в аргиллите алевритистом (РЭМ, увеличение 1500); н – упорядоченные агрегаты каолинита столбчатой формы в смеси иллита в песчанике глинистом (РЭМ, увеличение 1000); о – дифрактограмма аргиллита алевритистого.



от минералогии зерен. Такие случаи регенерации КПШ для данного региона встречались ранее в работах Т.И. Гуровой, А.В. Копелиовича [Гурова, Чернова, 1988; Копелиович, 1965].

В песчаниках часто отмечается регенерация зерен турмалина — явление достаточно редкое для осадочных разрезов. Размер зерен турмалина может достигать 0.3 мм. Новообразованные столбцы и грани могут вклиниваться в регенерационные каемки кварца. Толщина регенерационной каемки турмалина может достигать 0.1 мм (см. рис. 1д). Между обломочным зерном и каймой регенерации наблюдается отчетливо выраженная граница. Чаще всего регенерируется только одна сторона зерен. В кайме хорошо видны грани тригональных призм и пирамид. Цвет каймы по сравнению с зерном обычно характеризуется относительно более низкими интерференционными окрасками. Явление регенерации некоторых тяжелых минералов, в частности турмалина, было установлено в песчано-алевритовых породах рифея и венда Припятского прогиба [Гулис, 1995].

1.2. Перекристаллизация и деформационные структуры обломочных зерен

В нижневендских терригенных отложениях НБА активно проявляются процессы перекристаллизации зерен кварца, а также их стресс-коррозии. В них отмечаются микроструктуры бластеза обломочного кварца преимущественно рекристаллизационно-гранулярного типа с «шахматным» угасанием агрегатов новообразования. По наименее преобразованным обломкам кварца выявлено, что гранобластовые структуры зерен затрагивают каемки регенерации кварца (см. рис. 1е). Процессы стресс-коррозии прошли довольно активно, что выражается в массовой деформации зерен кварца, возникновении микротрещин и многочисленных полосок Бема. Сдавленные зерна имеют черные полоски, образованные вкрест направлению сдвига. Их появление связано с выдавливанием газовых пузырьков и других флюидов из зерен. В породах распространены конформные, сутурные и инкорпорационные микроструктуры на границах зерен (вплоть до полного исчезновения каемок). Большинство зерен кварца сдавленные и потрепанные (см. рис. 1ж). Выявлены шиповидные, или бородачатые структуры вращающихся слюды и хлоритов в кварцевые и полевошпатовые зерна (см. рис. 1з). В ряде случаев деформационные процессы в значительной степени затронули обломки глинистых пород. При этом в средне- и мелкозернистых песчаниках степень преобразованности глинистых обломков не велика,

а в более грубых разностях эти обломки преобразуются в цементирующую массу (см. рис. 1и). В среднем размер глинистых обломков достигает 0.4 мм, их содержание может составлять 10–15% объема породы.

В песчаниках отдельных разрезов НБА отмечаются микростилолитовые швы по напластованию пород. Швы малоамплитудные (0.1–0.15 мм) заполненные глинисто-органическим веществом, со сдавленными и деформированными глинистыми обломками и пластинками слюд (см. рис. 1к).

Процессы деформации пород проявляются как на микро-, так и на макроуровне. По всему разрезу осадочного чехла и в породах коры выветривания отмечаются Х-образные, вертикальные и разноориентированные трещины, а также ортогональные стилолитовые швы. По трещинам часто наблюдаются следы сдвигов пород (см. рис. 1л).

1.3. Преобразование глинистых минералов

В терригенных отложениях раннего венда отмечено содержание преобразованных глинистых минералов, являющихся чувствительными индикаторами стадий литогенеза. Так, например, отдельные пропластки аргиллитов содержат значительное количество диккита, каолинита, иллита, смешанослойных минералов, хлорита 7, 14Å, гидрослюда политипа 2M₁ (см. рис. 1м, н, о). Кристаллы хлорита образуют листоватые, чешуйчатые агрегаты, которые складываются в сплошные массы. Для железистых хлоритов характерны скрытокристаллические агрегаты и оолиты. Кристаллы каолинита встречаются в виде чешуек с гексагональными очертаниями, правильными шестиугольными контурами, часто сгруппированными в упорядоченные агрегаты столбчатых форм. Иллит, гидрослюда и смешанослойные наблюдаются в чешуйчатых и тонкопластинчатых массах, обычно в смеси с каолинитом и другими минералами. В силу лабильности кристаллических решеток эти минералы могут быть индикаторами термодинамических и геохимических параметров окружающей среды [Дриц, Сахаров, 1976; Карпова, 1972; Коссовская, Шутов и др., 1963; Котельников, Солодкова, 1995; Ломова, 1979; Милло, 1968; Парфенова, Япаскерт, 2000; Петрова, 2005].

Представленная в песчаниках каолинитизация в виде цемента свидетельствует о проникновении в пласт чужеродных вод с повышенной кислотностью. В песчаниках и гравелитах активно встречаются мусковитизация и хлоритизация биотита, а также вросстки каолинита внутри

полевых шпатов, при том контуры первоначальных зерен остались без изменений. Найденный в ряде разрезов диксит представляет собой полиморфную модификацию каолинита, которая образовалась при $T > 200^\circ\text{C}$. Возникновению модификации гидрослюды $2M_1$ политипа, а также хлорита 14\AA способствует, в первую очередь, термальная активизация. Глубокий прогрев нижневендских терригенных отложений сказался не только на изменении глинистых минералов, но и на структурных преобразованиях органического углерода в аргиллитовых породах. В отдельных пропластках аргиллита встречены выделения графита, подтвержденные данными РСА [Постникова, Постников, 2011].

1.4. Аутигенная цементация

Для терригенных отложений НБА характерно массовое развитие вторичной цементации порового и трещинного пространства. При этом отмечается отчетливая стадийность «залечивания» первичного порового пространства, которая проявляется в последовательной смене регенерационного цемента (кварцевого или калишпатового) на карбонатный, сульфатный и галитовый. Карбонатный материал, чаще всего представленный кристаллами доломита, корродирует регенерационные каемки обломочных зерен. Отмечаются несколько генераций доломита (рис. 2а). Вероятно, сопряженно с карбонатизацией происходило выщелачивание некоторых зерен кварца и КППШ.

Вслед за карбонатизацией наступила стадия сульфатизации порового пространства. Ангидрит полностью или частично заполняет остаточное пустотное пространство (см. рис. 2б). Карбонатный и сульфатный материалы могут заполнять микропустоты в регенерированных, перекристаллизованных зернах и проникать в их микротрещины (см. рис. 2в).

Финальной стадией заполнения пустотного пространства явилось засолонение (см. рис. 2г). Галит (редко сильвин) находится в породе в виде идиоморфных кубических кристаллов (см. рис. 2д), а также в виде «пластичной» массы, расклинивающей инкорпорационные контакты зерен (рис. 2е), что, возможно, приводит к образованию рыхлых пород за счет микрофлюидо-разрывов межзерновых контактов (см. рис. 2ж).

В ряде разрезов нижневендских отложений НБА отмечается окремнение и окварцевание, проходившие вслед за карбонатизацией (см. рис. 2з). На контакте кремнистого и карбо-

натного материала часто наблюдается зажатое глинисто-органическое вещество (см. рис. 2и).

1.5. Аутигенное минералообразование в макротрещинах

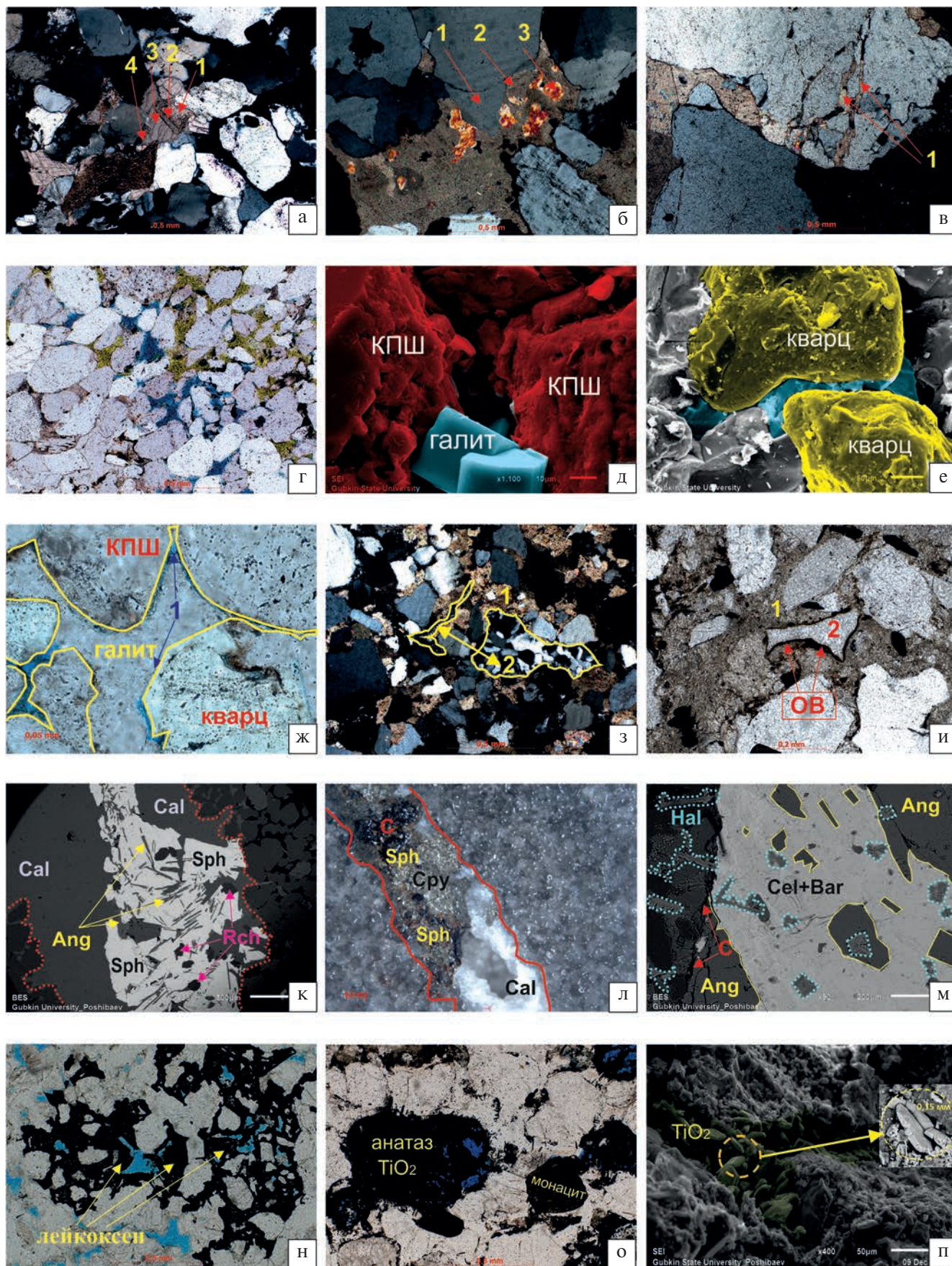
В ряде разрезов нижневендских отложений НБА отмечаются зоны с достаточно интенсивным развитием тектонических трещин различной раскрытости и направленности. Изучение минерального выполнения стенок трещин проводилось с помощью методов стереомикроскопии, РЭМ, РСА и микрорентгеноспектрального анализа. В результате исследований установлено, что стенки трещин последовательно минерализованы кристаллами: кальцита (железозамагнетизованного кальцита, магнезита, реже доломита), халькопирита, пирита, сфалерита, кубоаргирита, родохрозита, ангидрита, целестина и барита (см. рис. 2к, л, м). В трещинах были встречены примазки, сгустки, растрескавшиеся фрагменты преобразованного органического вещества, заполняющего остаточное пустотное пространство. К наиболее поздней стадии минерализации трещин относится образование кристаллов галита.

По результатам исследований РСА в около-трещинных зонах выявлены такие нетипичные для осадочных пород минералы, как бернессит, флогопит, диксит, весцелиит, анатаз, пирит с примесью соединений мышьяка и цеолиты (анальцим, ломонтит).

Спецификой отложений является часто встречаемые оксиды титана. В породах отмечается лейкоксенизация (см. рис. 2н), значительное количество вновь образованных кристаллов анатаза на стенках пор и трещин (см. рис. 2о, п).

2. МИНЕРАЛЬНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПАРАГЕНЕЗЫ СТАДИЙ И ТИПОВ ЛИТОГЕНЕЗА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД РАННЕГО ВЕНДА НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

Минералогические и структурные характеристики терригенных отложений раннего венда НБА являются результатом сложного сочетания и последовательного наложения различного типа эпигенетических преобразований. Процессами формирования и преобразования осадочных пород, разработкой основ сравнительного анализа эпигенетических преобразований отложений активно занимались с 1970-х годов [Коссовская, Шутов, 1963, 1971, 1981; Тимофеев, 1987; Лисицын, 1997; Холодов, 1982; Логвиненко, 1968; Логвиненко, Орлова, 1987; Страхов, 1960–1962; Япаскурт, 1992]. В работах были сформулирова-



ны признаки процессов диагенеза, а также разработано учение об эпигенезе осадочных пород, в рамках которого стали существовать стадийный и наложенный его варианты. В многочисленных работах, посвященных этой проблеме были определены характерные структурные и минеральные критерии распознавания типов литогенеза, которые использовались для диагностирования типов и стадий преобразования терригенных отложений раннего венда НБА.

Под эпигенетическими изменениями пород вслед за О.В. Япаскуртом [Япаскурт, 1995] авторы статьи понимают преобразования отложений на различных стадиях катагенеза и метагенеза. Относительно нижней границы диагенеза, а следовательно, и верхней границы катагенеза существуют различные точки зрения [Коссовская, Шутов, 1956, 1976; Страхов, 1960–1962; Логвиненко, 1968; Копелиович, 1965]. Под катагенезом авторы статьи понимают «стадию изменения вещественного состава и структуры осадочных отложений в стратисфере при повышении давления в диапазоне от 10 до 200 МПа и температурах от 25 до 200°C ($\pm 25^\circ\text{C}$) в присутствии и при активном участии подземных вод и (или) поровых растворов» [Япаскурт, 1995]. «Метагенез – это стадия формирования наложенных на образования катагенеза минеральных, структурных и текстурных изменений осадочных пород – предельно уплотненных и перекристаллизуемых (не полностью) при температуре 200–350°C, давлении выше 200 МПа с участием минерализованных растворов» [Япаскурт, 1995]. Минерально-парагенетический принцип диагностики этапов и стадий преобразования пород разработан еще

в 50-х годах прошлого века [Коссовская, Шутов, 1976; Коссовская, 1993; Логвиненко, Орлова, 1987]. Согласно этому принципу наличие определенных аутигенных минералов, структурно-текстурных преобразований являются показателем раннего или позднего ката- или метагенеза [Логвиненко, Орлова, 1987].

Эпигенез осадочных пород включает все постседиментационные преобразования отложений, однако, разделяется на эпигенез стадийного погружения и наложенный эпигенез [Эпигенез..., 1971]. Стадийные изменения, включающие различные шкалы катагенеза относятся к стадийно-эпигенетическим, а изменения, вызванные внедрением флюидов из внешних источников, к наложенно-эпигенетическим [Лебедев, 1992].

О.В. Япаскуртом были подробно исследованы типоморфные признаки литогенетических преобразований осадочных пород для разных структурных элементов земной коры, табл. 1 [Япаскурт, 1981, 1991, 1995]. Сформулированные О.В. Япаскуртом признаки геологических типов литогенетических преобразований, различающиеся по масштабу (региональные, локальные) и по времени проявления (фоновые и наложенные), были выявлены в терригенных отложениях раннего венда НБА.

Алевро-псаммитовая составляющая пород раннего венда представлена набором породообразующих минералов, источником которых стали магматические и метаморфические образования фундамента. Диагностировать в породах раннего венда диагенетический параге-

Рис. 2. Проявление эпигенетических процессов в породах раннего венда НБА: а — последовательное заполнение поры кристаллами доломита четырех генераций в песчанике средне-крупнозернистом (николи скрещены, увеличение 100); б — последовательное заполнение первичного порового пространства каемками регенерации (1), кристаллами доломита (2) и ангидрита (3) в гравелите мелкообломочном (николи скрещены, увеличение 100); в — карбонатный цемент (1) заполняет микротрещины в регенерированных зернах кварца, прорывая их (николи скрещены, увеличение 100); г — синим цветом окрашены остаточные поры, желтым — показаны зоны распространения галита в песчанике средне-мелкозернистом (николи параллельны, увеличение 100); д — голубым цветом показаны кристаллы галита в виде кубических распорок между зернами КПШ (РЭМ, увеличение 1100); е — голубым цветом выделена микрокристаллическая масса галита, расклинивающая инкорпорационные контакты зерен кварца (РЭМ, увеличение 370); ж — голубым цветом окрашены микротрещины (1) вокруг обломочных зерен песчаника крупнозернистого с галитовым заполнением пустотного пространства (николи параллельны, увеличение 500); з — желтым цветом выделено кремнение и окварцевание (2), проходившие вслед за карбонатизацией (1) в песчанике разнозернистом (николи скрещены, увеличение 100); и — на контакте карбонатного (1) и кремнистого (2) материалов наблюдается зажатое глинисто-органическое вещество в песчанике средне-мелкозернистом (николи параллельны, увеличение 200); к — последовательное выполнение трещины кальцитом (Cal), родохрозитом (Rch), ангидритом (Ang) и сфалеритом (Sph) (РЭМ, увеличение 33); л — последовательное выполнение трещины кальцитом (Cal), халькопиритом (Cpy) и сфалеритом (Sph), а также ступки растрескавшегося преобразованного органического вещества (С) (фото на стереоскопе, увеличение 10); м — последовательное выполнение трещины кальцитом (Cal), ангидритом (Ang), галитом (Hal), целестином (Cel) и баритом (Bar), а также органическое вещество (С) на стыке кальцита и ангидрита (РЭМ, увеличение 90); н — лейкоксенизация в песчанике средне-мелкозернистом (николи параллельны, увеличение 100); о — новообразованные кристаллы анатаза на стенках пор в гравелите мелкообломочном (николи параллельны, увеличение 100); п — желтым цветом показаны новообразованные кристаллы анатаза на стенках пор и трещин в коре выветривания фундамента (РЭМ, увеличение 400).

Таблица 1. Геологические типы литогенетических преобразований в осадочных бассейнах с континентальным строением земной коры [Япаскурт, 1991]

Над- типы	по масштабу проявления	Локальный			Региональный				
	по времени проявления	наложенный					фоновый (стадиальный)		
Тип литогенеза	ката- класти- ческий	гидро- термаль- номета- сомати- ческий	контак- товомаг- матических воздейст- вий	динамо- термальной активации		погружения			
Подтип литогенеза	—	—	—	интен- сивный	умерен- ный	преры- вистый	интен- сивный	вялый	

нез минералов весьма проблематично, в связи с их высокой вторичной преобразованностью. В тоже время в породах было установлено присутствие каолинита, доломита, гидрослюды 1М, смешанослойных, хлорита 7Å, гипса, свидетельствующих о прохождении алевро-псаммитами стадии раннего катагенеза [Парфенова, Япаскурт, 2000; Перозио, 1956, 1967а]. Для ранних стадий катагенеза стадиального погружения также характерно появление первых каемок регенерации зерен кварца и образование конформных контактов, появление пирита, хлоритизация, а также пелитизация КПШ [Япаскурт, 1989].

Интенсивная регенерация зерен кварца частично могла быть связана с геохимическими процессами, происходившими в зонах древних водонефтяных контактов (ВНК). Многими исследователями описаны процессы осаждения вторичного кремнезема в такого рода зонах [Зарипов, 1968; Алексева, Каледа, 1975; Сахибгареев, 1968, 1970, 1976, 1978, 1983, 1989; Вакуленко, 2017]. На наличие следов древних ВНК могут указывать скопления высоко преобразованных углеводородов (УВ), зажатых в межконтактных зонах обломочных зерен и остаточных пустотах. Признаки разрушения древних залежей нефти и газа в вендских толщах юга Сибирской платформы в виде скоплений твердых нефтидов описаны в работе М.И. Витухиной [Витухина, 1992].

В процессе погружения и уплотнения отложений повышались пластовые температуры и давления, что привело к преобразованию глинистых минералов петрофонда и развитию гидрослюды 2M₁ политипа, хлорита 14Å и смешанослойных, которые сформировались в результате процессов трансформации кристаллических микроструктур слоистых силикатов в твердой среде без фазовых переходов [Милло, 1968]. Данные ми-

нералы формируются на стадии позднего катагенеза стадиального погружения. Для этой стадии в исследуемых породах характерна парагенетическая минеральная ассоциация, включающая кварц, халцедон, каолинит, ломонтит, гидрослюды политипа 2M₁, смешанослойные (реликты), хлорит, хлорит 14Å, анатаз, рутил, лейкоксен, турмалин, кальцит, ангидрит [Запорожцева, 1960, 1963; Ломова, 1979; Парфенова, Япаскурт, 2000; Перозио, 1956, 1967б]. Для поздних стадий катагенеза также характерно появление следов стресс-коррозии: полосок Бема, новообразованных инкорпорационных, микростиллитовых микроструктур, сопровождающихся явлением катаклаза, шиповидные структуры вращающихся слюд и хлоритов в кварцевые и полевошпатовые зерна, а также регенерация турмалина [Япаскурт, 1984]. Большое значение для новообразования турмалина имеют высокие содержания бора и лития в подземных рассолах, что было выявлено на примере рифейских отложений Припятского прогиба [Гулис, 1995].

Как правило, в песчаных и песчано-гравийных породах развитие каемок регенерации кварца закономерно сменяется карбонатизацией пород, которая, в свою очередь, имеет региональный характер и отражает смену геохимической обстановки в пласте с кислотной на щелочную. В ряде случаев в шлифах отчетливо видно, как вслед за карбонатизацией наступает стадия окремнения, связанная с внедрением в породу кислых растворов кремнезема. Финальной стадией является стадия сульфатизации, которая обусловлена влиянием щелочных растворов, и проявляется в виде кристаллов ангидрита, заполняющих пустотное пространство. Закономерная последовательность выделения кварца-доломита-халцедона-ангидрита в пустотном пространстве пород

отражает цикличность смены геохимических обстановок в пласте [Коссовская, Шутов, 1956].

В терригенных породах раннего венда отмечаются структурные преобразования пород, связанные не только с фоновым (стадиальным) литогенезом, но и с проявлениями локального наложенного процесса метагенеза. Так, для ранних стадий метагенеза динамотермальной активации характерно появление диккита и рекристаллизационно-гранулярных бластовых структур обломочных зерен кварца, которые затронули каемки регенерации [Япаскурт, 2008]. Наиболее ярко процессы локального температурного разогрева проявлены в глинистых породах, первично обогащенных ОВ, в которых развиваются радиально-лучистые агрегаты графита. Этот процесс может быть связан с контактовым метаморфизмом в зонах контакта с крупными трапповыми интрузиями [Постникова и др, 2011].

Наиболее поздние структурные преобразования пород проявились на стадии локального наложенного катакластического литогенеза. Они заключаются в формировании зон трещиноватости и сдвиговых деформаций, а также формировании вертикальных стилолитовых швов. В отдельных разрезах в трещинных зонах ярко проявлены минеральные парагенезы, связанные с локальным наложенным гидротермально-метасоматическим литогенезом. Минеральные парагенезы включают флогопит, барит, сфалерит, пирит с примесью соединений мышьяка, халькопирит, родохрозит, санидин, анальцит, целестин, кубоаргирит, кальцит, доломит, магnezит, ангидрит [Гидротермальное низкотемпературное..., 1982; Главные гидротермальные..., 2009; Логвиненко, Орлова, 1987; Япаскурт, 2008; Петрова, 2005]. На этой стадии отмечается мусковитизация и хлоритизация биотита, каолинитизация внутри полевых шпатов, регенерация и выщелачивание КППШ при неизменных первоначальных формах зерен.

Завершающей стала парагенетическая ассоциация галита и сильвина, связанная с локальным наложенным гравитационно-рассольным катагенезом (галокатагенезом), понятие о котором было введено В.Н. Холодовым [Холодов, 1982].

Одной из гипотез, объясняющих процессы интенсивного засоления, является гипотеза гравитационно-рассольного катагенеза, который, видимо, был обусловлен интенсивным прогревом вышележащих кембрийских соленосных отложений магматическими расплавами, которые прорывали толщу осадочного чехла

в пермо-триасовое время [Гажула, 2008]. Температура на контактах магмы с вмещающими породами могла достигать порядка 1200°C. Такие высокие температуры способствовали расплавлению каменной соли. Эти расплавы, просачиваясь в нижележащие вендские отложения, заполняли остаточное пустотное пространство терригенных пород-коллекторов.

В качестве альтернативной гипотезы объяснения явлений засоления, особенно в прифундаментной части осадочного чехла, можно рассмотреть процесс выделения кристаллов галита и ангидрита из эндогенных гидротермальных флюидов [Основные проблемы..., 1981; Жарков, 1974; Жуковская, 2011; Махнач, 1981; Пиннекер, 1966; Поливанова, 1977; Шварцев, 1977]. Такой вариант формирования рассолов и соляных отложений был изложен в работе Т.Р. Бойко, посвященной соляным отложениям в озере Сёрлз в Калифорнии [Бойко, 1963]. С этой точки зрения можно объяснить наличие сульфатов даже в глубоких уровнях коры выветривания фундамента и в трещинных зонах, значительно ниже его поверхности. С позиции эволюции эндогенно-гидротермальной системы значительно легче обосновать направленность процесса многостадийного заполнения пустотного пространства парагенезом карбонатов, сульфатов, сульфидов меди, цинка, серебра и мышьяка терригенного комплекса основания осадочного чехла [Основные проблемы..., 1981; Петрова, 2005; Холодов, 1995; Юдович, Кетрис, 2008]. Длительная эволюция и активизация такой эндогенно-гидротермальной системы могла способствовать локальному возрастанию солёности кембрийского солеродного бассейна.

Гидротермально-метасоматические реакции, происходящие при обязательном участии жидкого водного раствора, роль которого неоднократно подчеркивал Д.С. Коржинский, включают в себя одновременные процессы осаждения и растворения минералов [Коржинский, 1955]. Механизм гидротермальных метасоматических реакций зависит от физико-химических условий процесса и соотношения скоростей реакций растворения и осаждения табл. 2 [Коржинский, 1969].

Главнейшим фактором, определяющим течение постмагматического процесса и смену одних минеральных парагенезисов другими, является режим кислотности-щелочности растворов [Коржинский, 1953]. Суть этой концепции сводится к следующему: из очага кристаллизирующейся и остывающей магмы непрерывно поднимается

Таблица 2. Стадии постмагматического процесса гидротермально-метасоматических образований [Коржинский, 1969]

Постмагматическая (ранняя щелочная)	Выщелачивания (кислотная)	Осаждения (поздняя щелочная)	Заключительная (остаточные нейтральные растворы)
Микроклинизация, альбитизация, магнезиальный метасоматоз	Вынос всех оснований; осаждение кварца	Осаждение оснований; осаждение рудных минералов	Прогрессивный метасоматоз; образование бедных кварц-кальцитовых и кальцитовых жилков

поток восходящих растворов, воздействующий на вмещающие породы. Кислотность растворов сначала повышается, достигает максимума и затем снова понижается. Выявленные в гравийно-песчаных породах раннего венда микроклинизация, альбитизация, магнезиальный метасоматоз могут быть отнесены к ранней постмагматической (щелочной) стадии гидротермально-метасоматических процессов. Вслед за карбонатизацией в породах отмечается окварцевание микротрещин, которое могло произойти на стадии выщелачивания (кислотная стадия), когда из пород массово выносятся основания. Эта стадия наступает лишь в средне- и низкотемпературных условиях. После достижения максимальной кислотности происходит инверсия постмагматического процесса. Наступает стадия осаждения (поздняя щелочная стадия), которая характеризуется осаждением оснований. Кислотные компоненты перемещаются быстрее оснований и уходят вперед по потоку растворов. При этом кислотность растворов понижается, растворы пересыщаются основаниями, которые начинают осаждаться в порядке возрастающей основности. Осаждаются как привнесенные магматогенные компоненты, так и компоненты, выщелоченные в кислотную стадию из вмещающих пород. Так, могли образовываться целестин и барит, а также оксиды титана (лейкоксен, рутил), которые замещают Fe-Mg минералы в зонах кислотного выщелачивания [Главные гидротермальные..., 2009]. Процессы выщелачивания и осаждения компонентов являются сопряженными, при этом в верхней части потока происходит преимущественно осаждение, а в нижней — сопряженное с ним выщелачивание. Этим, видимо, объясняется, что процессы выщелачивания КПШ отмечаются только в базальных отложениях раннего венда. При повышении щелочности и среднетемпературных условиях могли формироваться сфалерит с включениями халькопирита в виде наростов на стенках трещин. Заключительная стадия (стадия остаточных ней-

тральных растворов) отличается воздействием на породу остаточных растворов, имеющих нейтральный характер. На этой стадии могли образоваться низкотемпературные безрудные или обедненные кварцево-кальцитовые и кальцитовые жилки, ломонтит, родохрозит и ангидрит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Терригенные породы раннего венда НБА являются продуктом многостадийной эволюции процессов минералообразования. Она выражена в смене парагенезов минералов, сформировавшихся на стадиях регионального фонового (стадиального) литогенеза погружения — диагенеза, раннего и позднего катагенеза, а также вследствие сложного сочетания локальных наложенных типов литогенеза — катакластического, гидротермально-метасоматического и динамотермальной активации. Локальные наложенные процессы могли сопровождать эпоху траппового магматизма пермо-триасового возраста. Следует отметить, что, несмотря на локальность проявления, гидротермальные процессы имеют регионально выдержанные характеристики.

Высокая степень преобразованности пород терригенного комплекса раннего венда определяет специфику их структуры, состава и физических свойств, которые необходимо учитывать в процессе геологоразведочных работ, направленных на поиски месторождений различных полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева М.А., Каледа Г.А.* О времени формирования нефтяных залежей в карбонатных коллекторах по эпигенетическим изменениям пород // Геология нефти и газа. 1975. № 9. С. 41–46.
- Бойко Т.Р.* Озеро Сёрлз и его литиеносные и вольфрамосодержащие рассолы // Труды ИМГРЭ АН СССР. 1963. 47 с.

- Вакуленко Л.Г.* Роль постседиментационных процессов в формировании и изменении коллекторских свойств мезозойских терригенных пород Западной Сибири (история исследований) [Электронный ресурс] // Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге. 2017. Режим доступа: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/43040/1/conference_tpu-2017-C118_p22-34.pdf
- Витухина М.И.* Геолого-геохимические условия образования залежей нефти и газа в древних толщах юга Сибирской платформы (Непско-Боутобинской антеклизы) / Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук: 04.00.17. М., 1992. 24 с.
- Гажула С.В.* Особенности траппового магматизма в связи с условиями нефтегазоности Сибирской платформы Т. 3 // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. № 1. С. 1–8.
- Гидротермальное низкотемпературное рудообразование и метасоматоз // Труды ИГиГ СО АН СССР. Новосибирск: Наука, 1982. 158 с.
- Главные гидротермальные минералы и их значение / Под ред. В.И. Белоусова. США: Отдел геотермальной и рудной служб Кингстон Моррис Лимитед, 2009. 40 с.
- Гулис Л.Ф.* Постседиментационные изменения отложений рифея и нижнего венда Беларуси. Минск: Институт геологических наук АН Беларуси, 1995. 102 с.
- Гурова Т.И., Чернова Л.С.* Литология и условия формирования резервуаров нефти и газа Сибирской платформы. М.: Недра, 1988. 251 с.
- Дриц В.А., Сахаров Б.А.* Рентгеноструктурный анализ смешанослойных минералов. М.: Наука, 1976.
- Жарков М.А.* Условия формирования соленосных отложений Сибири и перспективы их калиеносности Т. 1. М.: Наука, 1974. С. 127–166.
- Жуковская Е.А.* Опыт изучения засоления терригенных коллекторов Восточной Сибири // Современные вызовы при разработке и обустройстве месторождений нефти и газа Сибири. 2011. С. 124–125.
- Запорожцева А.С.* Ломонтит из меловых отложений Ленского угленосного бассейна Т. 120 // Докл. АН СССР. 1958. № 2. С. 958–960.
- Запорожцева А.С.* О региональном распространении ломонтита в меловых отложениях Ленского угленосного бассейна // Изв. АН СССР. Сер. Геология. 1960. № 9. С. 61–69.
- Зарипов О.Г.* Эпигенез и его влияние на коллекторские свойства песчано-алевритовых пород продуктивных горизонтов неокма Среднего Прибоя / Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Тюмень, 1968. 21 с.
- Карпова В.Г.* Глинистые минералы и их эволюция в терригенных отложениях. М.: Недра, 1972. 256 с.
- Копелиович А.В.* Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы. М.: Наука, 1965. 349 с.
- Коржинский Д.С.* Инфильтрационный метасоматоз при наличии температурного градиента и приконтактовое метасоматическое выщелачивание Т. 82 // Записки ВМО. 1953. № 3. С. 161–172.
- Коржинский Д.С.* Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 335–456.
- Коржинский Д.С.* Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1969. 109 с.
- Коссовская А.Г.* Развитие идей Л.В. Пустовалова в проблеме преобразования осадочных пород в метаморфические // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. М., 1993. № 4. С. 22–31.
- Коссовская А.Г., Шутов В.Д.* Зональное изменение терригенных пород при эпигенезе, начальном метаморфизме в условиях геосинклинальной зоны // Вопросы минералогии осадочных образований. Львов: Изд-во Львов. унта, 1956. С. 452–467.
- Коссовская А.Г., Шутов В.Д.* Фации регионального эпигенеза и метагенеза // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1963. № 7. С. 3–18.
- Коссовская А.Г., Шутов В.Д.* Проблемы эпигенеза // Эпигенез и его минеральные индикаторы. М.: Наука, 1971. С. 9–34.
- Коссовская А.Г., Шутов В.Д.* Типы регионального эпигенеза и начального метаморфизма и их связь с тектонической обстановкой на континентах и в океанах // Геотектоника. 1976. № 2. С. 15–30.
- Коссовская А.Г., Шутов В.Д., Дриц В.А.* Глинистые минералы-индикаторы глубоководного изменения терригенных пород // Геохимия, петрография и минералогия осадочных образований. М.: Наука, 1963. С. 120–130.
- Коссовская А.Г., Шутов В.Д., Симанович И.М.* Современное состояние и перспективы развития проблем эпигенеза предметаморфизма на континентах и в океанах // Литология на новом этапе развития геологических знаний. М.: Наука, 1981. С. 45–62.
- Котельников Д.Д., Солодкова Н.А.* Структурные преобразования и морфологические особенности глинистых минералов в седименто- и литогенезе. Т. 70 // Бюлл. МОИП. Отд. Геология. 1995. С. 72–85.
- Лебедев Б.А.* Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. Л., 1992. 239 с.
- Лисицын А.П.* Новые идеи в литологии и осадочной геохимии Т. 1 // Новые идеи в науках о Земле. М.: Изд-во Наука, 1997. С. 11.
- Логвиненко Н.В.* Постдиагенетические изменения осадочных пород. Л.: Наука, 1968. 92 с.
- Логвиненко Н.В., Орлова Л.В.* Образование и изменение осадочных пород на континенте и в океане. Л., 1987. 237 с.
- Ломова О.С.* Палыгорскит и сепиолит как индикаторы геологических обстановок. М.: Наука, 1979. 180 с.
- Махнач А.А.* Галокатагенез – специфическая совокупность наложенных постседиментационных процессов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1981. № 10. С. 141–145.
- Милло Ж.* Геология глин (выветривание, седиментология, геохимия). Л.: Недра, 1968. 360 с.
- Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция / Под ред. Ю.Г. Леонова, Ю.А. Воложа. М.: Научный мир, 2004. 526 с.

- Основные проблемы соленакопления / Под ред. А.Л. Яншина, М.А. Жаркова. Новосибирск: Наука, 1981. 205 с.
- Парфенова О.В., Янакурт О.В.* Новое о трансформации слюдов при катагенезе терригенных комплексов (на примере пород триаса Тюменской СГБ). Т. 2 // Проблемы литологии, геохимии и рудогенеза осадочного процесса. М.: ГЕОС, 2000. С. 93–99.
- Пероziо Г.Н.* Эпигенетические преобразования в песчаниках и алевролитах юры и мела Западно-Сибирской низменности / Г.Н. Пероziо // Литология и полез. ископаемые. 1966. № 3. С. 58–70.
- Пероziо Г.Н.* Вторичные изменения мезозойских отложений центральной и юго-восточной части ЗСН // Постседиментационные преобразования осадочных пород Сибири. М.: Наука, 1967а. С. 5–69.
- Пероziо Г.Н.* Катагенез и глубинный эпигенез в гранулярных коллекторах нефти Усть-Балыкского месторождения // Постседиментационные преобразования осадочных пород Сибири. М.: Наука, 1967б. С. 70–98.
- Петрова В.В.* Низкотемпературные вторичные минералы и их роль в литогенезе (силикаты, алюмосиликаты, гидроксиды). М.: ГЕОС, 2005. 240 с.
- Пиннекер Е.В.* Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука, 1966. 332 с.
- Поливанова А.И.* Рассолы солеродных бассейнов и подземные рассолы районов соленакопления Т. 1. Новосибирск, 1977. С. 186–192.
- Постникова О.В., Постников А.В., Коновальцева Е.С. и др.* Вторичные процессы в породах-коллекторах ярактинского горизонта юго-восточного склона Непско-Ботубинской антеклизы // Литология и полез. ископаемые. 2011. № 5. С. 447–456.
- Решения Всероссийского стратиграфического совещания по разработке региональных стратиграфических схем верхнего докембрия и палеозоя Сибири / Ред. В.В. Хоментовский. Новосибирск: Наука, 2012. 91 с.
- Сахибгареев Р.С.* Особенности эпигенетических изменений пород-коллекторов нефтяных месторождений Сургутского свода // Тр. Гипротюменьнефтегаза. 1968. С. 43–45.
- Сахибгареев Р.С.* О генезисе пленочного хлоритового цемента песчано-алевритовых пород неокома центральной части Западно-Сибирской низменности Т. 195 // Докл. АН СССР. 1970. № 5. С. 1183–1185.
- Сахибгареев Р.С.* О связи литологии и литогенеза с геофлюидодинамическими процессами (на примере домика Русской платформы в аспекте формирования углеводородных скоплений). Л., 1976. С. 47–68.
- Сахибгареев Р.С.* О коррозии минералов нефтями и битумами // Геология и геохимия горючих ископаемых. Киев: Наукова думка, 1978. С. 22–24.
- Сахибгареев Р.С.* Гидрофобизация песчаников на ранних этапах литогенеза, признаки ее проявления и значение для прогноза коллекторов // Проблемы регионального и локального прогноза коллекторов. Минск: БелНИТРИ, 1983. С. 31–35.
- Сахибгареев Р.С.* Изменения коллекторов на водонефтяных контактах // АН СССР. 1983. Т. 271. №6. С. 1456–1460.
- Сахибгареев Р.С.* Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. Л.: Недра, 1989. 260 с.
- Сергеева Э.И.* Эпигенез осадочных пород / Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 152 с.
- Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза Т. 1. М.: АН СССР, 1960. 212 с.
- Тимофеев П.П.* Проблемы литологии // Литология и полез. ископаемые. 1987. № 3. С. 3–16.
- Холодов В.Н.* К проблеме генезиса полезных ископаемых элизионных впадин. Сообщение 1. Южно-Каспийский элизионный бассейн // Литология и полез. ископаемые. 1990. № 6. С. 3–25.
- Холодов В.Н.* Новое в познании катагенеза. Элизионный катагенез // Литология и полез. ископаемые. 1982. № 5. С. 15–32.
- Холодов В.Н.* Модель элизионной рудообразующей системы и некоторые проблемы гидротермально-осадочного рудогенеза // Редкометалло-урановое рудообразование в осадочных породах. М., 1995. С. 10–30.
- Шварцев С.Л.* О формировании крепких и предельно насыщенных подземных рассолов. Т. 1 // Проблемы соленакопления. Новосибирск: Наука, 1977. С. 192–195.
- Шемин Г.Г.* Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботубинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина). Новосибирск: СО РАН, 2007. 467 с.
- Эпигенез и его минеральные индикаторы / Под ред. А.Г. Коссовской. М.: Наука, 1971. 172 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Минеральные индикаторы литогенеза. Сыктывкар: Геопринт, 2008. 564 с.
- Янакурт О.В.* Вопросы типизации постдиагенетического литогенеза (в складчатых системах) // Изв. вузов. Геология и разведка. 1991. № 10. С.40–55.
- Янакурт О.В.* Генетическая минералогия и стадийный анализ процессов осадочного породо- и рудообразования. М.: ЭСЛАН, 2008. 356 с.
- Янакурт О.В.* Литогенез и полезные ископаемые миегосинклиналей. М.: Недра, 1992. 224 с.
- Янакурт О.В.* О взаимоотношениях катагенеза и начального метаморфизма // Вестник МГУ. 1981. № 5. С. 33–38.
- Янакурт О.В.* Стадийный анализ литогенеза. М., 1995. 142 с.
- Янакурт О.В.* Типы постседиментационных преобразований терригенных толщ Северного Верхоянья и прилегающей территории // Новое в современной литологии. М.: Наука, 1981. С. 51–55.
- Янакурт О.В.* Типы глубоких постседиментационных преобразований осадочных отложений на примере верхоянского комплекса мезозойского. М.: Наука. 1984. С. 231–232.
- Янакурт О.В.* Эндогенные литогенетические процессы во внутриконтинентальных геосинклинально-складчатых поясах // Вестник МГУ. 1989. № 3. С. 15–25.

Evolution of Mineral Formation Processes in Lower Vend Terrigenous Rocks of Nepsko-Botuobinskaya Antecline

A. V. Postnikov, O. V. Postnikova, E. S. Izyurova*,
V. V. Poshibaev, A. S. Kuznetsov, A. D. Izyurov, and A. E. Kozionov

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

Leninsky Prospekt, 65, Moscow, 119991 Russia

**E-mail: ekonovalceva@yandex.ru*

Received May 24, 2017

Abstract – Principal common factors of epigenetic occurrence in Lower Vend rocks of Nepsko-Botuobinskaya antecline are shown in the article. Evolution of mineral formation processes is stated in the change of mineral paragenesis, which were formed on stages of regional background (stadial) lithogenesis of foundering – diagenesis, early and late katagenesis; and also as a result of local superimposed lithogeneous types complex combination – cataclastic, hydrothermal, metasomatic and dynamothermal activation. Local superimposed processes could accompany the period of Permo-Triassic trap magmatism. High degree transformation of Lower Vend terrigenous rocks of Nepsko-Botuobinskaya antecline determinates its structure, composition and physical properties specificity, which should be taken into account in process of geological exploration of different mineral deposits.

Key words: *Siberian platform, Nepsko-Botuobinskaya antecline, terrigenous rocks, Vend, katagenesis, mineralogy*

DOI: 10.31857/S0024-497X2019131-43