



DEFORMATION CHANGES IN THE FAMENNIAN-TOURNAISSIAN CARBONATE ROCKS IN THE NORTHWESTERN MARGINAL FAULT ZONE OF THE CASPIAN BASIN

V.V. Korobkin , Zh.S. Tulemissova ✉, A.E. Chaklikov

Kazakh-British Technical University, 59 Tole Bi St, Almaty 050000, Kazakhstan

ABSTRACT. The Northwestern marginal fault zone is a part of the Caspian Basin and a boundary transition structure separating the basin from the Volga-Ural region. It has been found that this fault zone is characterized by a complex kinematic development leading to the formation of a linear salt-dome structure. Research has been carried out on deformation changes in the Famennian-Tournaisian carbonate rocks in the Northwestern marginal fault zone. A set of macro- and microscopic studies made it possible to assess the nature of deformation changes, the state of structural and textural maturity, the composition of the original rocks, as well as to identify the composition of secondary minerals and void space and determine the kinematic types of tectonic fractures formed therein. The recognition of carbonate mineralogical varieties has been performed by the method of thin section staining with alizarin red, which made it possible to distinguish between calcite and dolomite and to determine their quantitative ratio in thin sections. The carbonate samples were studied by X-ray diffraction, and thermal and probe methods, which revealed the features of the crystalline phase and accessory impurities and provided a characterization of the crystalline structure of minerals. Analytical studies made it possible to identify thermally inert formations of calcium, magnesium, silicon and iron oxides and other compounds in carbonates and to determine the nature of deformation changes in the Famennian-Tournaisian carbonate reservoir rocks.

KEYWORDS: Caspian Basin; Northwestern marginal fault zone; carbonate reservoir; deformation changes; detachment and shear fractures; microscopic analysis; X-ray diffractometric analysis; thermal analysis; probe microanalysis

FUNDING: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (No. BR21882301, "Comprehensive solution to the current problems in geology, mining and processing of mineral and hydrocarbon raw materials").



EDN: HH00QZ

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Zhamal S. Tulemissova, z.tulemissova@kbtu.kz

Received: February 11, 2025

Revised: April 3, 2025

Accepted: April 14, 2025

FOR CITATION: Korobkin V.V., Tulemissova Zh.S., Chaklikov A.E., 2025. Deformation Changes in the Famennian-Tournaisian Carbonate Rocks in the Northwestern Marginal Fault Zone of the Caspian Basin. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (3), 0829. doi:10.5800/GT-2025-16-3-0829

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФАМЕН-ТУРНЕЙСКИХ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ПРИБОРТОВОЙ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЕ ПРИКАСПИЙСКОГО БАССЕЙНА

В.В. Коробкин, Ж.С. Тулемисова, А.Е. Чакликов

Казахстанско-Британский технический университет, 050000, Алматы, ул. Толе би, 59, Казахстан

АННОТАЦИЯ. Северо-Западная Прибортовая разломная зона входит в состав Прикаспийского бассейна и является граничной переходной структурой, отделяющей его от Волго-Уральского региона. Установлен сложный кинематический тип развития этой разломной зоны, который формирует линейную соляно-купольную структуру. Было проведено изучение деформационных преобразований фамен-турнейских карбонатных пород в Северо-Западной Прибортовой разломной зоне. Выполнен комплекс макро- и микроскопических исследований, которые позволили оценить характер деформационных преобразований, состояние структурно-текстурной зрелости, состав исходных пород, а также выявить состав вторичных минералов и пустотное пространство и определить кинематические типы возникших тектонических трещин. Для определения минералогических разновидностей карбонатов был применен метод окрашивания в шлифе красным ализарином, что позволило отличить кальцит и доломит и количественно определить их соотношения в шлифах. Штуфы образцов карбонатов были изучены рентгеноструктурным, термическим и зондовым методами, и таким образом выявлены особенности состава кристаллической фазы и акцессорных примесей, установлен характер кристаллического строения минералов. Аналитические исследования позволили выявить в составе карбонатов термически инертные образования оксидов кальция, магния, кремния, железа и других соединений и установить характер изменений деформационных преобразований фамен-турнейских карбонатных пород-коллекторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Прикаспийский бассейн; Северо-Западная Прибортовая разломная зона; карбонатный коллектор; деформационные преобразования; тектонические трещины отрыва и скола; микроскопический анализ; рентгенодифрактометрический анализ; термический анализ; зондовый микроанализ

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (№ BR21882301, «Комплексное решение актуальных вопросов, связанных геологией, добычей и переработкой минерального и углеводородного сырья»).

1. ВВЕДЕНИЕ

Прикаспийский бассейн расположен в юго-восточной части Восточно-Европейского кратона. Большая часть его площади (примерно две трети) принадлежит Республике Казахстан и является главной нефтегазональной провинцией страны. Осадочный чехол бассейна, имеющий мощность от 6 до 24 км в вертикальном измерении, подразделяется на три литолого-стратиграфические единицы: 1) подсолевая (мезопротерозой – пермь, артинский ярус); 2) соленосная (пермь, кунгурский ярус); 3) надсолевая (гваделупский отдел перми – мезозой – кайнозой) [Daukeev et al., 2002; Zholtaev et al., 2021; Cohen et al., 2004].

Северо-Западная Прибортовая разломная зона Прикаспийского бассейна (нефтегазональной провинции) является граничной переходной структурой, отделяющей бассейн от Волго-Уральского региона. Установлен сложный кинематический тип развития этой разломной зоны, осложненный соляно-купольной тектоникой. Разнообразие генетических типов пустот в карбонатных породах определяет создание в них сложного коллектора. На ранней стадии формирования накоплений (сингенез и ранний диагенез) важное значение приобретает сочетание основных параметров, таких как глубина осадения карбонатов, кислородный режим, гидродинамическая активность, состав морской

и поровой воды, влияние источников сноса. Последующие преобразования вызваны тектоническими перестройками вдоль Прибортовой разломной зоны, которые активизируют движения флюидов, в том числе углеводородов. В результате этих преобразований первичная структура породы может быть изменена [Daukeev et al., 2002; Bagrintseva et al., 2003; Fortunatova et al., 2021].

Целью данного исследования является изучение влияния деформационных изменений карбонатных пород-коллекторов фамен-турнейского возраста в Северо-Западной Прибортовой разломной зоне Прикаспийского бассейна.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

На северо-западе Прикаспийского бассейна в подсолевом комплексе развита система граничных крутонаклонных разломов преимущественно сбросового типа [Kuandykov et al., 2011; Iskaziev et al., 2020; Lapkovsky et al., 2023], маркирующих разломную зону (рис. 1, 2). Характерной особенностью верхней части подсолевого разреза является наличие в нем обширного карбонатного массива. Коллекторами служат карбонатные породы и, в первую очередь, органогенные известняки девонского и каменноугольного возраста, в которых локализованы главные нефтегазовые месторождения.

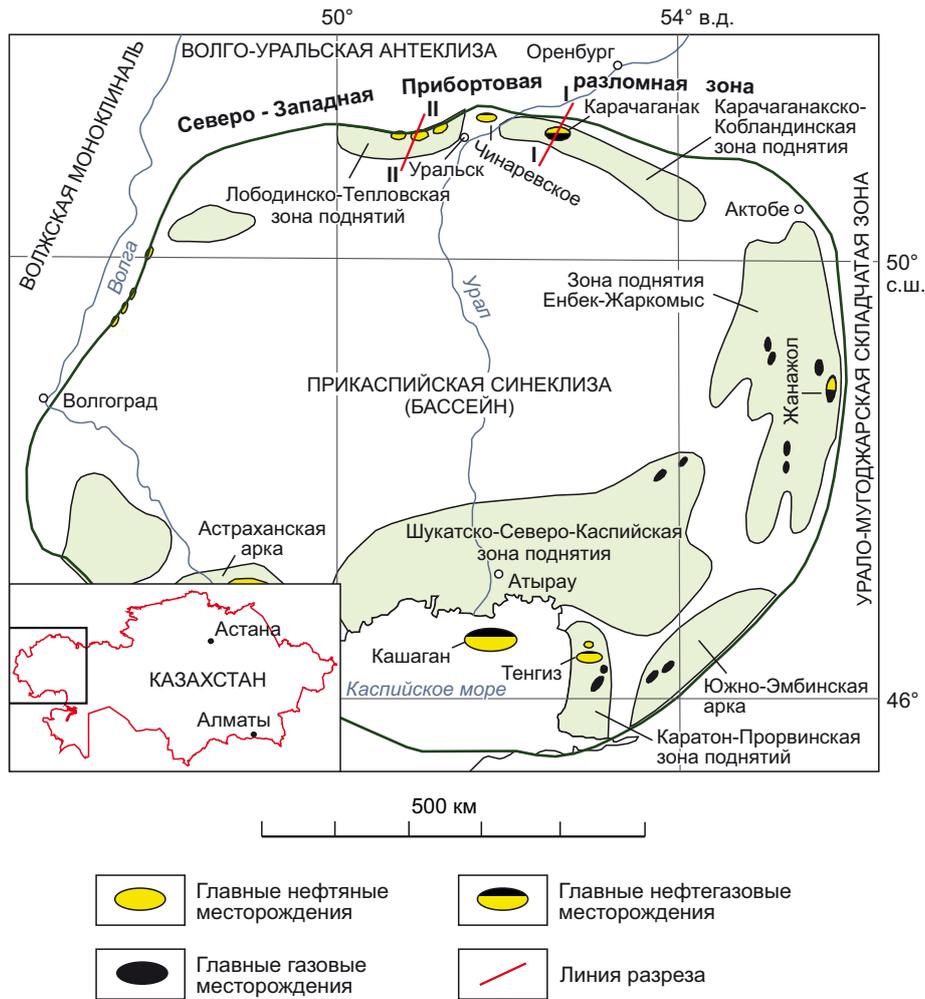


Рис. 1. Модифицированная обзорная схема Прикаспийского бассейна ([Bagrintseva et al., 2003; Akchulakov et al., 2014], с дополнениями авторов).

Северо-Западная Прибортовая разломная зона отделяет Прикаспийский бассейн (синеклизу) от Волго-Уральской антеклизы, вдоль которой располагаются нефтегазоконденсатные месторождения Карачаганак, ЧМ, Тепловское и др.

Fig. 1. An overview scheme of the Caspian syneclyse (basin) (modified and supplemented after [Bagrintseva et al., 2003; Akchulakov et al., 2014]).

The Northwestern marginal fault zone separates the Caspian Basin (syneclyse) from the Volga-Ural anteclise, along which the Karachaganak, Chinarevo (CF), Teplovskoye and other oil and gas condensate fields are located.

На протяжении длительного времени изучались свойства массивных карбонатных коллекторов таких известных и уникальных по запасам углеводородного сырья месторождений, как Карачаганак, Астраханское, Тенгиз, Кашаган, Жанажол, и других объектов [Bagrintseva et al., 2003; Kuandykov et al., 2011; Akchulakov et al., 2014; Matloshinsky, 2017; Iskaziev et al., 2019, 2020; Fortunatova et al., 2021]. Другие месторождения Чинаревской и Лободинско-Тепловской группы, расположенные в Северно-Западной Прибортовой разломной зоне (рис. 2, 3, 4), имеют пластовые и пластово-массивные резервуары.

На примере Чинаревского нефтегазоконденсатного месторождения (ЧМ) рассмотрены вопросы деформационных преобразований фамен-турнейских пластово-сводовых карбонатных коллекторов (рис. 5, 6, 7, 8, 9). На ЧМ установлены два промышленно продуктив-

ных стратиграфических уровня нефтегазоносности: 1) газоконденсатный живетско-франкий и 2) фамен-турнейский газонефтяной [Daukeev et al., 2002; Kuandykov et al., 2011; Akchulakov et al., 2014; Votsalevskiy et al., 2016; Iskaziev et al., 2020; Abilkhasimov, 2021]. Ловушка имеет сложное комбинированное геологическое строение. В живетско-турнейское время формировалась карбонатная пластово-массивная залежь, преобразованная впоследствии в антиклиналь с осложняющим ее субширотным сбросом (см. рис. 3) [Votsalevskiy et al., 2016], который инициировал широкое развитие трещин отрыва и скола.

На ЧМ карбонатные породы турнейского и верхней части фаменского яруса сформировались в условиях морского шельфа [Kuandykov et al., 2011; Iskaziye, 2019; Iskaziev et al., 2020] с изменяющейся пористостью от 6 до 12 %, средней пористостью газонасыщенной

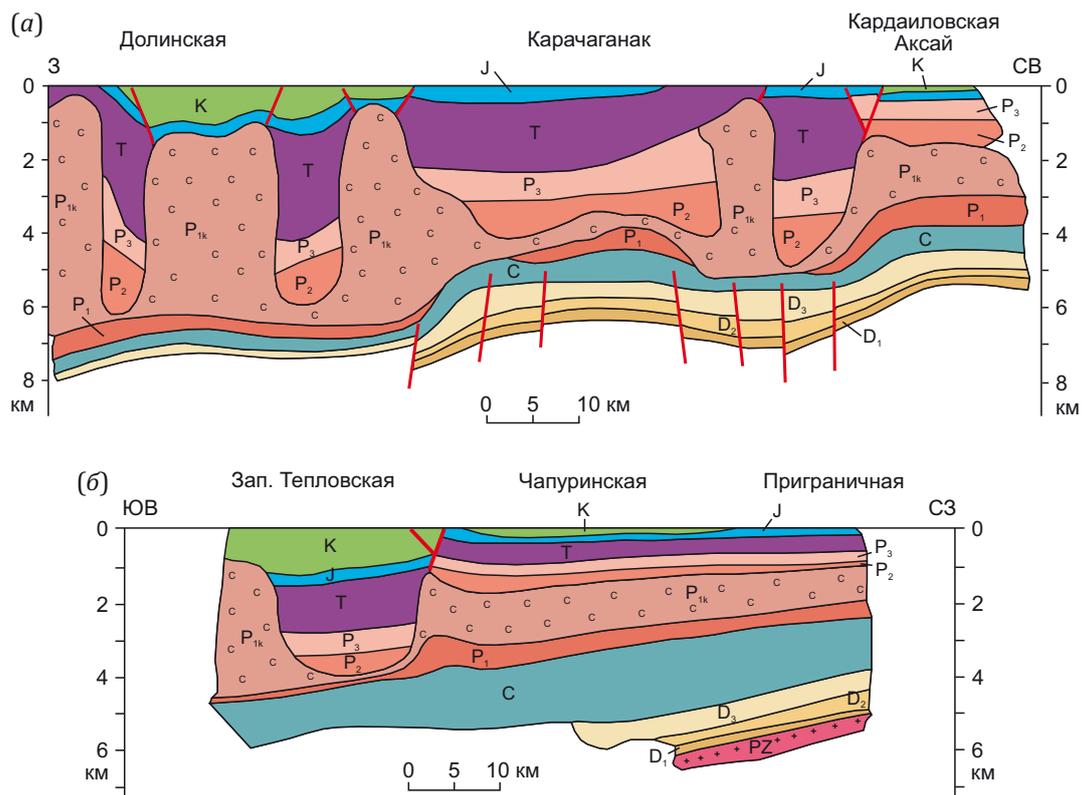


Рис. 2. Геологические разрезы Северо-Западной Прибортовой разломной зоны [Daukeev et al., 2002; Votsalevskiy et al., 2016]: (а) – нефтегазоконденсатного месторождения Карачаганак, (б) – Лободинско-Тепловской группы месторождений.

Fig. 2. Geological sections of the Northwestern marginal zone [Daukeev et al., 2002; Votsalevskiy et al., 2016]: (a) – Karachaganak oil and gas condensate field, (b) – Lobodin-Teplovskoye field group.

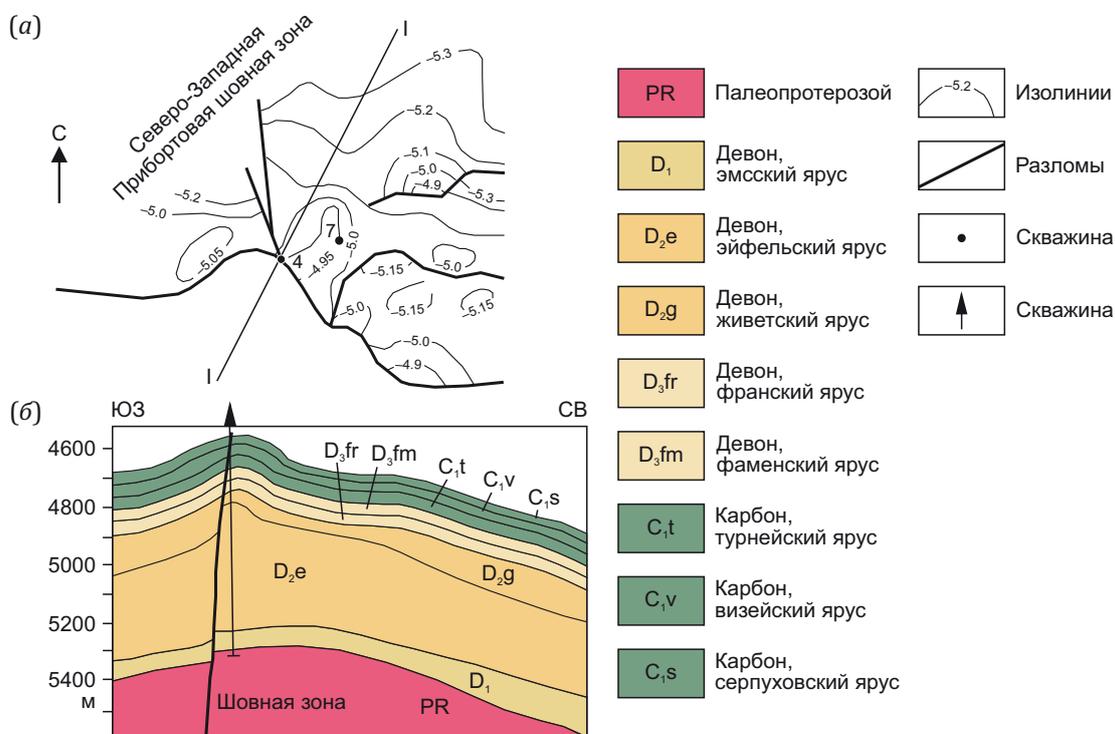


Рис. 3. Северо-Западная Прибортовая разломная зона в районе нефтегазовых месторождений Чинаревское и Лободинско-Тепловской группы. (а) – структурная схема; (б) – геологический разрез по линии I-I [Votsalevskiy et al., 2016; Iskaziev, 2019].

Fig. 3. Northwestern marginal fault zone in the area of the Chinarevskoye and Lobodin-Teplovskoye field group: (a) – structural diagram; (b) – geological section along line I-I [Votsalevskiy et al., 2016; Iskaziev, 2019].

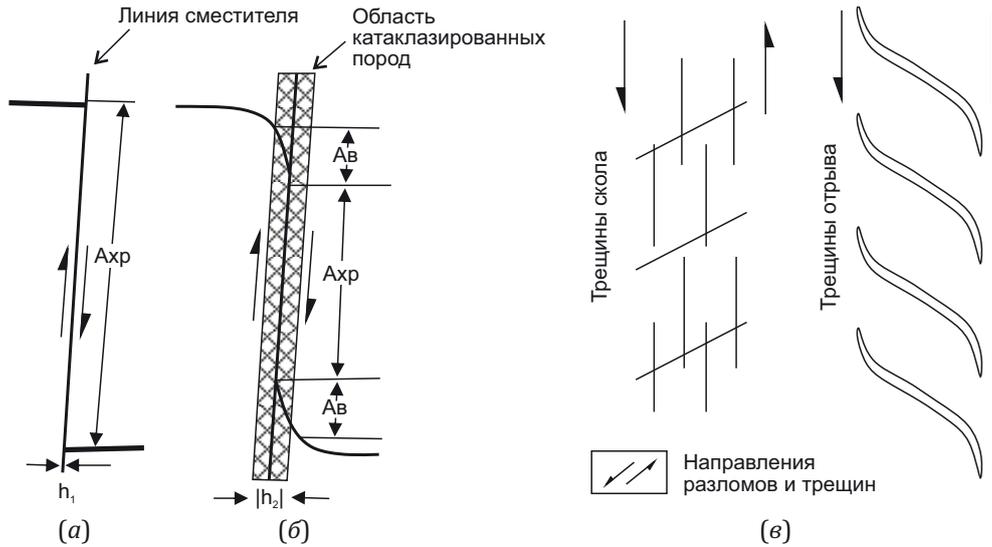


Рис. 4. Реологические типы разломов в разрезе: (а) – хрупкий, (б) – хрупковязкий. Компоненты амплитуды: A_{xp} – хрупкий, A_v – вязкий, h – ширина зоны разлома (близкая к нулевой у хрупкого разлома и относительно наибольшая у вязкого разлома). (в) – структурный парагенезис приразломной части хрупких швов.

Fig. 4. Rheological types of faults in the cross-section: (а) – brittle, (б) – brittle-viscous. Amplitude components: A_{xp} – brittle, A_v – viscous, h – fault zone width (close to zero for a brittle fault and relatively largest for a viscous fault). (в) – the structural paragenesis of the near-fault part of brittle sutures.

части коллектора – 8.9 %, нефтенасыщенной – до 8.1 %. Нефтяная турнейская залежь с маломощной газовой шапкой вскрыта и испытана скважиной, ГНК (газонефтяной контакт) установлен на глубине 4318 м, мощность газоносной толщи составляет 43 м. ВНК (водонефтяной контакт), вероятно, находится на уровне 4503 м. Установленная высота нефтяной залежи составляет 77 м, эффективные газо- и нефтенасыщенные толщины в скважине достигают соответственно 12.4 и 61.4 м [Iskaziev, 2019; Demeeva, 2020].

В районе ЧМ карбонатная седиментация проходила на приподнятом выступе фундамента, образовавшегося в результате бретонской фазы складчатости (по Х. Штилле) на границе фаменского и турнейского ярусов. Тонкообломочные и крупнообломочные отложения накапливались во впадинах, окружавших Чинаревское поднятие.

В целом исследуемые породы-коллекторы фаментурнейского яруса представлены известняками, доломитами, известковистыми доломитами с редкими включениями ангидрита и гипса. Искомые породы в ходе дальнейшей эволюции претерпели эпигенетические и деформационные преобразования. Пустотное пространство представлено порами трещин отрыва, скола и порами выщелачивания. Имеются также каверны, приуроченные к трещинам, на стенках которых отмечаются крупные кристаллы доломита. Среди пород широко развиты биокластовые водорослевые известняки со стилолитами.

В разломной зоне широко проявлены трещины отрыва и скола. Породы трещиноватые, закрытые, заполненные вторичными минералами и открытые, субгоризонтальные, субвертикальные, неравномерно по-

ристые в соответствии с рис. 5 и 6. Валовая пористость в среднем составляет 8–9 %.

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Проводилось макро- и микроскопическое изучение пород (структурная диагностика проявления катаклаза, трещин отрыва и скола, определение минерального состава, структуры и текстуры, пустотного пространства). Описание пород-коллекторов выполнено на поляризационных микроскопах серии LEICA DM 750 и ПОЛАМ Р-312. Для диагностики карбонатов использован специальный метод исследования, в частности метод окрашивания карбонатов в шлифе ализарином красным по методу И. Митчелла [Mitchell, 1956], позволяющий отличить кальцит от доломита.

Изучение вещественного состава пород выполнено методами термического и рентгенодифрактометрического анализа. Контроль элементного, оксидного и углеродного состава ряда образцов проводился с привлечением метода рентгенометрического зондового микроанализа.

Термический анализ осуществлялся на термовесовой установке – дериватографе марки Q-1500D системы F.Paulik, J.Paulik&L.Erdei. Метод основан на регистрации прибором изменений термохимических и физических параметров вещества, которые могут быть вызваны при его нагревании. Термохимическое состояние пробы описывается кривыми: Т (температурной), DTA (дифференциальной термоаналитической), TG (термогравиметрической) и DTG (дифференциальной термогравиметрической, являющейся производной от TG-функции). Производство анализа осуществлялось в воздушной среде, в диапазоне температур от 20 до 1000 °С.

Режим нагрева печи – линейный ($dT/dt=10$ град/мин), эталонное вещество – прокаленный Al_2O_3 . Навеска образца составляла строго 500 мг, при чувствительности весов 200 мг на шкалу измерения. Съёмка анализа осуществлялась в следующих пределах измерительных систем прибора: DTA=250, DTG=500, TG=500, T=500 μ V. Результаты анализа сравнивались с данными приведенных в атласах термических кривых минералов и горных пород и сопоставлялись с описаниями термического поведения проб, изложенными в других справочных источниках и накопленными в банке данных лаборатории, проводившей эти исследования.

Рентгенофазовые определения проводились на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с $CuK\alpha$ -излучением, β -фильтр. Рентгенофазовые анализы измерения на полуколичественной основе выполнялись по дифрактограммам порошковых проб с применением метода равных навесок и искусственных смесей. Определялись количественные соотношения кристаллических фаз. Интерпретация дифрактограмм проводилась с использованием данных картотеки ICDD: база порошковых дифрактометрических данных PDF2 (Powder DiffractionFile) и дифрактограмм чистых от примесей минералов. Для основных фаз проводился расчет содержания. Идентификация возможных примесей не может быть однозначной из-за малых содержаний и присутствия только 1–2 дифракционных рефлексов или плохой окристаллизованности.

Наряду с традиционными классическими способами изучения состава пород, в некоторых образцах был определен их элементный и оксидный состав с привлечением метода рентгенометрического микроанализа. Съёмка выбранных образцов из разных площадей выполнялась на электронном зондовом микроанализаторе марки Superprobe 733 фирмы JEOL (Япония). Анализы элементного состава проб и фотосъёмка в различных видах излучений выполнялись с использованием энергодисперсионного спектрометра INCA 8N8RGY фирмы Oxford Instruments (Англия), установленного на вышеуказанном микроанализаторе (Superprobe 733) при ускоряющем напряжении в 25 кВ и токе зонда 25 мА.

Широкое применение указанных методов при изучении керна карбонатов подсолевого комплекса позволило осуществить диагностику деформационных структур (проявления катаклаза, трещин отрыва, скола), а также выявить и оценить изменения минерального состава, структуры, текстуры и пустотного пространства в породах (см. рис. 4, 5, 6, 7, 8; рис. 9).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Карбонатные коллекторы на месторождении представлены в основном органогенно-комковатыми известняками, которые в процессе деформационных преобразований были частично или полностью перекристаллизованы и доломитизированы, и доломитами замещения по органогенным известнякам. В известняках форменные элементы (комки, сгустки) размером

0.1–1.0 мм овальной, округлой, удлиненной и неправильной формы сложены пелитоморфным кальцитом, сцементированы карбонатным материалом лучшей раскристаллизованности (см. рис. 5, 6, 7).

Сложены карбонатные коллекторы кальцитом, доломитом, в небольшом количестве встречается барит, ангидрит, пирит, глинистые минералы, присутствует тонкорассеянная примесь органического вещества, иногда в виде пленки на поверхности карбонатов или «выпотов» в керне (см. рис. 5, е). Из органогенных остатков встречаются остракоды, брахиоподы, криноидеи, аммониты, сложенные тонкозернистыми карбонатами. Структура пород органогенно-комковатая, кристаллически-зернистая, текстура слабослоистая или беспорядочная. Породы пористые, трещиноватые и кавернозные (см. рис. 5, 6). Трещины преимущественно тектонические, а также стилолиты (по морфологии зубчатые и бугорчатые), выполненные глинисто-органическим веществом. Они представляют собой ослабленные зоны, по которым раскалываются породы, образуя неровную поверхность (см. рис. 5, ж, з). Вдоль стилолитов наблюдаются новообразования крупных зерен карбонатов (кальцита, доломита), пирита. Эти зоны благоприятны для образования открытых трещин.

В результате микроскопических исследований выявлены эпигенетические и деформационные процессы перекристаллизации, доломитизации, замещения, выщелачивания и вторичного минералообразования. Была отмечена сульфатная минерализация, которая приводит к запечатыванию пустот и таким образом снижает пористость карбонатных коллекторов (см. рис. 7, а).

В изученных породах отмечаются пустоты, образованные в результате выщелачивания кальцита органогенных остатков криноидей и остракод (см. рис. 7, б, г) самых различных размеров: от мелких пор до крупных каверн неправильной формы (см. рис. 6). Поры и каверны часто инкрустированы хорошо образованными кристаллами доломита ромбоэдрической формы (см. рис. 7, в, д, и).

Кристаллы доломита имеют ромбоэдрическую форму в зернистой массе кальцита (см. рис. 7, в), когда она сравнительно интенсивная, а хорошо ограненные ромбоэдры доломита соприкасаются либо ребрами, либо вершинами с гранями (см. рис. 7, и). При такой упаковке между ними остаются свободными значительные, соизмеримые с зернами, межзерновые пространства; в результате пористость известняков заметно возрастает. Поры занимают около 10 %, в результате наложенного катаклаза имеют угловатую и неправильную форму, расположены между ромбоэдрическими крупными (до 1 мм) зернами доломита, в основном изолированные (см. рис. 7, д). Форменные образования (органогенные остатки) доломитизированы и некоторые пересечены более поздним прожилком, что говорит о позднем процессе доломитизации (см. рис. 7, г).

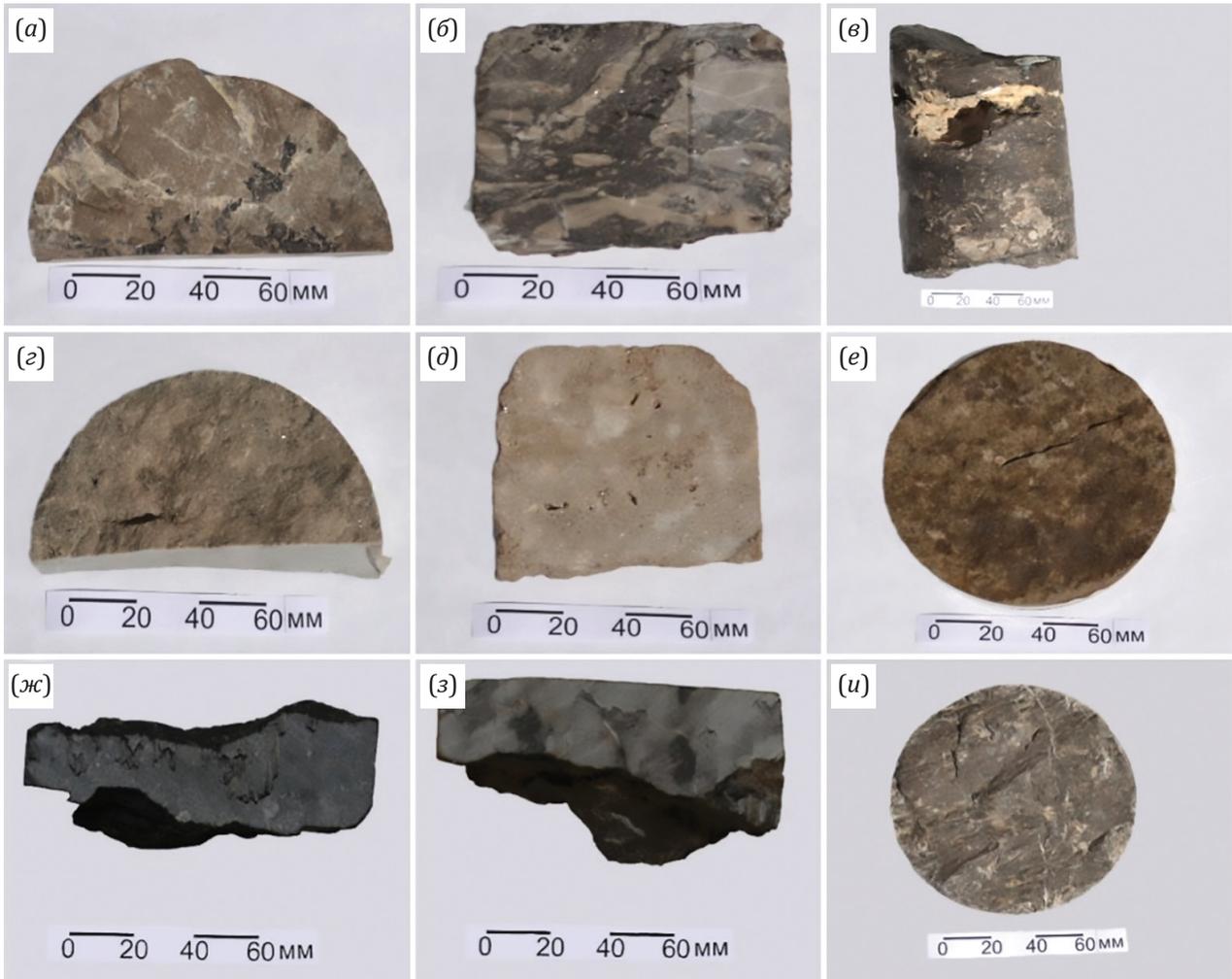


Рис. 5. Керн карбонатных фаменско-турнейских пород-коллекторов.
 (а) – известняк, глубина 4390 м; (б) – доломит, глубина 5083–5090 м; (в) – известняк доломитизированный с признаками УВ, глубина 4943–4952 м; (г) – известняк, глубина 4367 м; (д) – доломит, глубина 4616–4621 м; (е) – известняк, глубина 2802 м; (ж) – известняк, глубина 4334 м, стилолиты; (з) – известняк, глубина 4390 м, стилолиты; (и) – известняк, глубина 4924 м.
Fig. 5. The core of the Famennian-Tournaisian carbonate reservoir rocks.
 (а) – limestone, depth 4390 m; (б) – dolomite, depth 5083–5090 m; (в) – dolomitized limestone showing signs of hydrocarbon presence, depth 4943–4952 m; (г) – limestone, depth 4367 m; (д) – dolomite, depth 4616–4621 m; (е) – limestone, depth 2802 m; (ж) – limestone, depth 4334 m, stylolites; (з) – limestone, depth 4390 m, stylolites; (и) – limestone, depth 4924 m.



Рис. 6. Наклонная трещина тектонического отрыва в катаклазированном известняке (деталь рис. 5, в) с последующим развитием кавернозности и новообразованиями карбонатных минералов.
Fig. 6. Inclined detachment fracture in cataclastic limestone (detail of Fig. 5, в) with subsequent development of cavernosity and new formations of carbonate minerals.

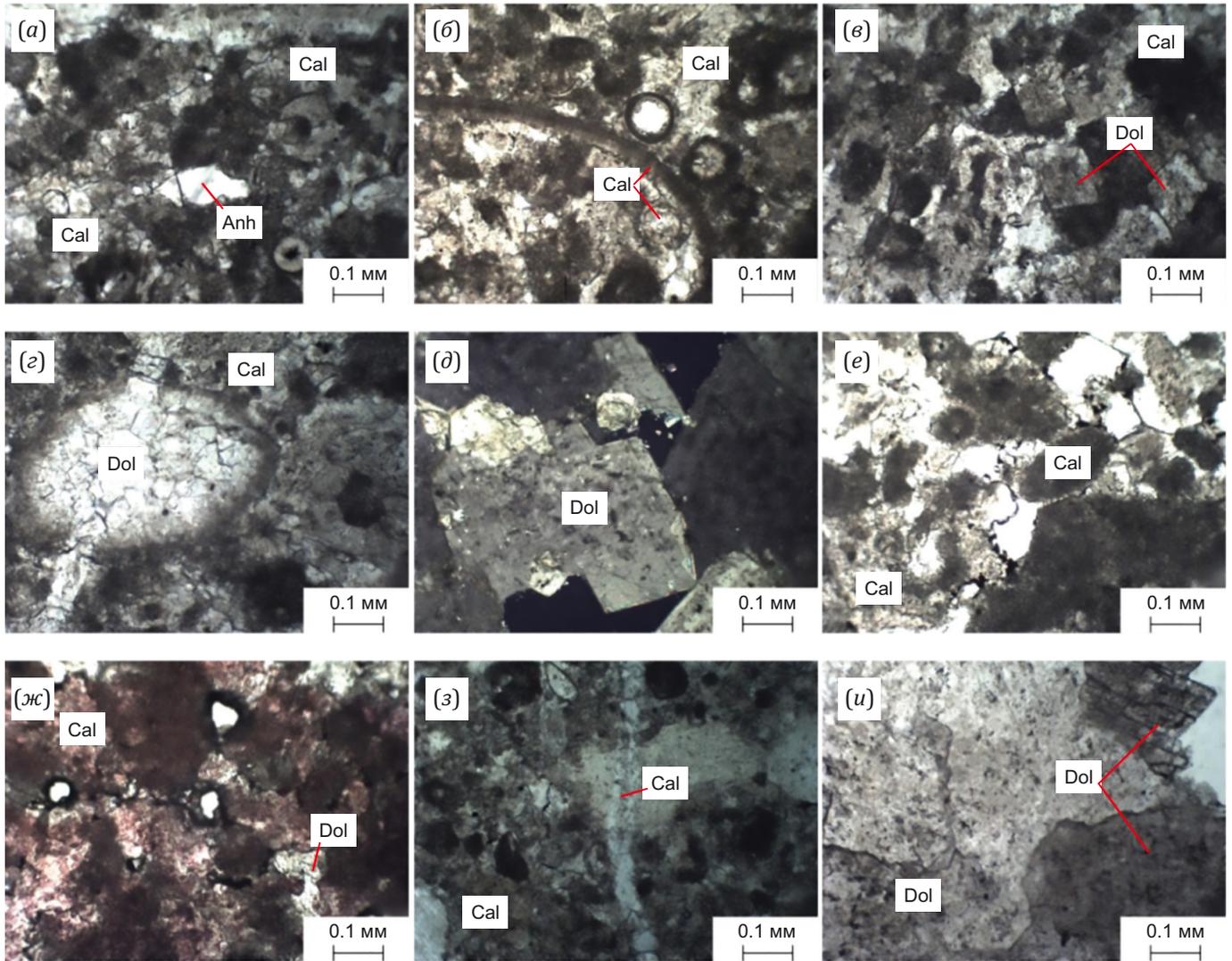


Рис. 7. Фотографии шлифов (обозначения: Cal – кальцит, Dol – доломит, Anh – ангидрит). Дислокационные изменения фамен-турнейских карбонатных породах.

(а, б, в, з) – катаклазированные органогенно-комковатые известняки, частично перекристаллизованные и доломитизированные. Глубина – 4390 м. Николь один; (д) – катаклазированный доломит, кристаллический зернистый. Глубина – 4616–4621 м. Николь +; (е) – известняк органогенно-комковатый. Глубина – 4380 м. Николь один; (ж) – известняк органогенно-комковатый (после окрашивания ализарином красным). Глубина – 4380 м. Николь один; (з) – известняк органогенно-комковатый, слабо перекристаллизованный. Глубина – 4915 м. Николь один; (у) – доломит кристаллический зернистый. Глубина – 4616–4621 м. Николь один.

Fig. 7. Photographs of thin sections (Cal – calcite, Dol – dolomite, Anh – anhydrite). Dislocation changes in the Famennian-Tournaisian carbonate rocks.

(а, б, в, з) – cataclastic organogenic-lumpy limestones, partially recrystallized and dolomitized. Depth – 4390 m. Nicol one; (д) – cataclastic, granular crystalline dolomite. Depth – 4616-4621 m. Nicols +; (е) – organogenic-lumpy limestone. Depth – 4380 m. Nicol one; (ж) – organogenic-lumpy limestone (after staining with alizarin red). Depth – 4380 m. Nicol one; (з) – organogenic-lumpy limestone, slightly recrystallized. Depth – 4915 m. Nikol one; (у) – granular crystalline dolomite. Depth – 4616-4621 m. Nicol one.

При динамическом нагревании образца карбонатной породы, изъятая с глубины 4616–4621 м, на дифференциальных (DTA и DTG) кривых были отмечены явно выраженные эндотермические проявления, вызванные реакциями деструкции термически активных компонентов пробы. Морфология указанных кривых, оформленная в пределах 495–850 °С, свидетельствует о наличии в образце доломита, кальцита, магнетита и сидерита (см. рис. 8) [Korobkin et al., 2023].

По этим кривым на базе суммарных термических проявлений, полученных в процессе обжига, были реконструированы пики, относящиеся к диссоциациям следующих соединений – $MgCO_3$, $CaCO_3$, $CaMg(CO_3)_2$ и $FeCO_3$ [Ivanova et al., 1974; Putnis, McConnel, 1980; Samatov, Urumbaev, 1997]. При этом в выявленных интервалах температур, в которых осуществлялось поэтапное удаление в атмосферу диоксида углерода (CO_2), были определены потери веса, соответствующие величинам

26.3, 10.35, 6.5 и 2.6 %. С учетом этих выбросов и стехиометрических формул указанных карбонатов установлены их процентные содержания в пробе, где доломит составил 55.1, кальцит – 23.5, магнезит – 12.5 и сидерит – 6.8 % соответственно.

Рентгенофазовым анализом изучаемого образца получена кривая с серией дифракционных пиков, из которых лишь один (D – 2.8842) достигает интенсивности, приемлемой для идентификации присутствующих фаз (см. рис. 8). Данный пик свидетельствует о наличии в пробе доломита. Остальные дифракционные рефлексы оставили на кривой весьма слабо развитые пики, что может быть обусловлено низким содержанием в пробе веществ, вызвавшим эти дисперсные всплески, или же связано с присутствием в породе плохо окристаллизованных минералов-примесей. Результаты полуко-

личественного рентгенофазового анализа кристаллических фаз приведены на рис. 9.

В отличие от результатов полуколичественного рентгенометрического измерения, термический анализ обнаружил в пробе не только доломит, но также в заметных количествах кальцит, магнезит и сидерит. Таким образом, отсутствие на рентгенограмме (рис. 9) явно выраженных дифракционных рефлексов кальцита, магнезита и сидерита не означает их полное отсутствие в образце. Рентгеноструктурным анализом указанные карбонаты не были обнаружены из-за несовершенства кристаллических строений их решеток. Эти минералы даже при существенных дефектах своих структур практически сохраняют присущие им термохимические свойства и легко диагностируются методами DTA. По данным комплексных (РФА и DTA) измерений

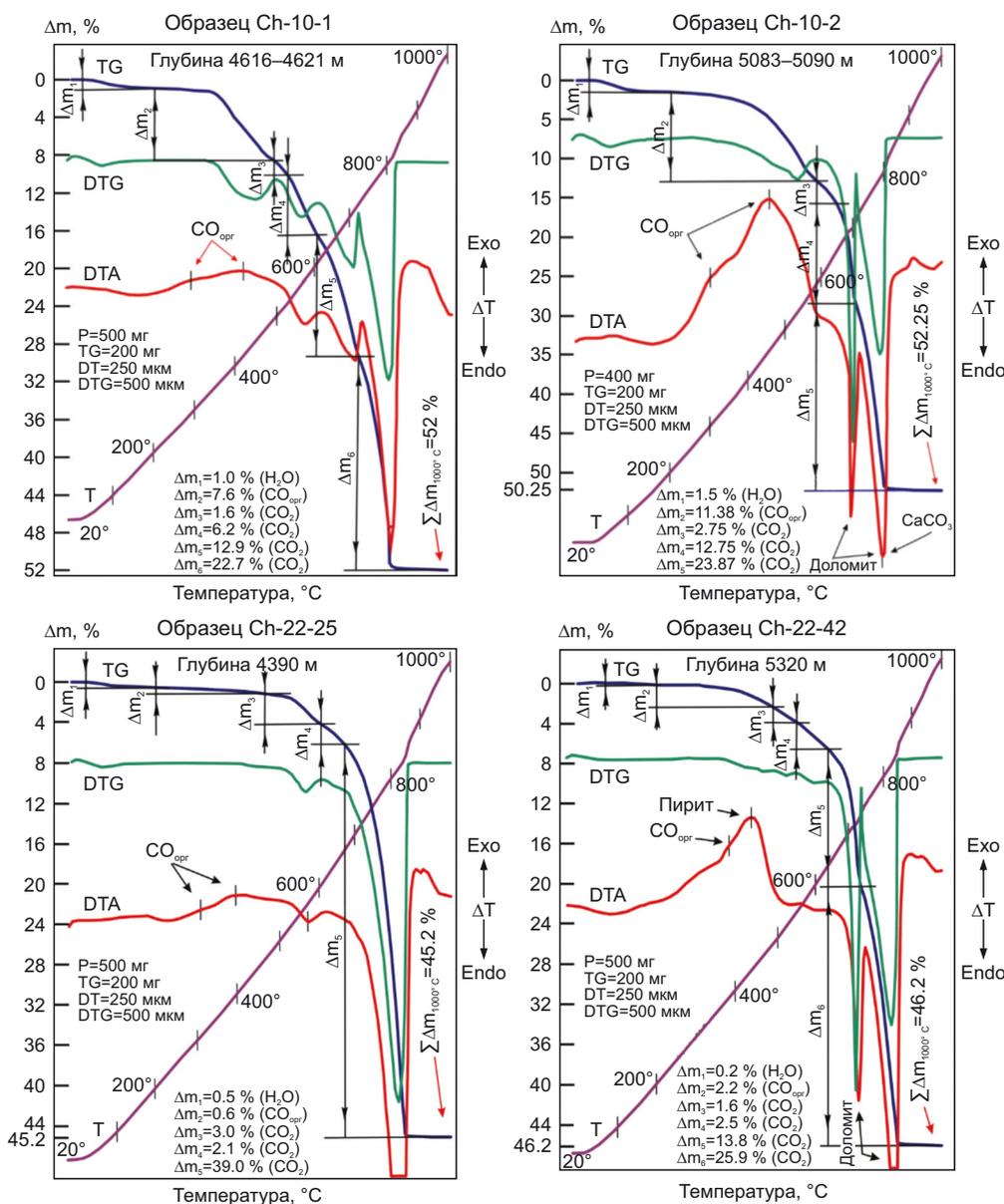


Рис. 8. Дериватограммы карбонатных пород-коллекторов.
 Fig. 8. Derivatograms of carbonate reservoir rocks.

в составе образца присутствует хорошо окристаллизованный доломит, а также карбонаты кальция, магния и железа, кристаллические решетки которых недостаточно развиты [Korobkin et al., 2023].

Несколько иное поведение при обжиге проявила порода, которая была взята из более глубокого горизонта (5083–5090 м). Однако термическая деструкция ее компонентов большей частью схожа с последним, что свидетельствует об идентичности их вещественного состава. В условиях динамического нагрева исследуемая проба оставила на своих кривых такие же изгибы, которые прослеживались на линиях вышерассмотренной дериватограммы (см. рис. 8). Здесь также ведущую роль в формировании аналоговой информации о процессах, протекающих в системе, играют температурно-хронологические параметры деструкции карбонатных образований, а также качество молекулярных связей H_2O , CO_2 и $CO_{орг.}$ в структурах минералов. В данной системе лишь одно из указанных соединений – H_2O – при выходе в атмосферу не несет в себе сколько-нибудь значимых сведений о состоянии испытываемой системы в связи малым содержанием его в пробе (1.5 %) и отсутствием связей с каким-либо кристаллическим включением образца. Реакции,

прослеженные в интервалах более высоких температур (645–825 °C), проявились на всех кривых дериватограммы. По расположению пиков на DTA- и DTG-кривых в испытываемом диапазоне температур и с учетом их амплитуд, отвечающих за степень интенсивности термических реакций, была установлена принадлежность каждого процесса разложения пробы к той или иной структуре.

Таким образом (по минеральным принадлежностям компонентов комплекса) производилась дифференциация термических проявлений. В указанном выше промежутке температур обычно разлагается доломит и кальцит. У доломита $[CaMg(CO_3)_2]$ процесс деструкции протекает в два этапа. Сначала наблюдается диссоциация магниевой составляющей, при которой из системы выносятся 50 % существующего диоксида углерода, затем происходит разложение кальциевой компоненты, сопровождаемое потерей остального количества CO_2 (также 50 %). Таким образом, по термогравиметрическим данным образца потеря веса ($\Delta m_3 + \Delta m_5$), вызванная деструкцией указанного карбоната в пределах 585–645 и 645–825 °C, составила 26.6 %; с учетом его стехиометрической формулы, количество доломита в составе пробы соответствует 56.0 %.

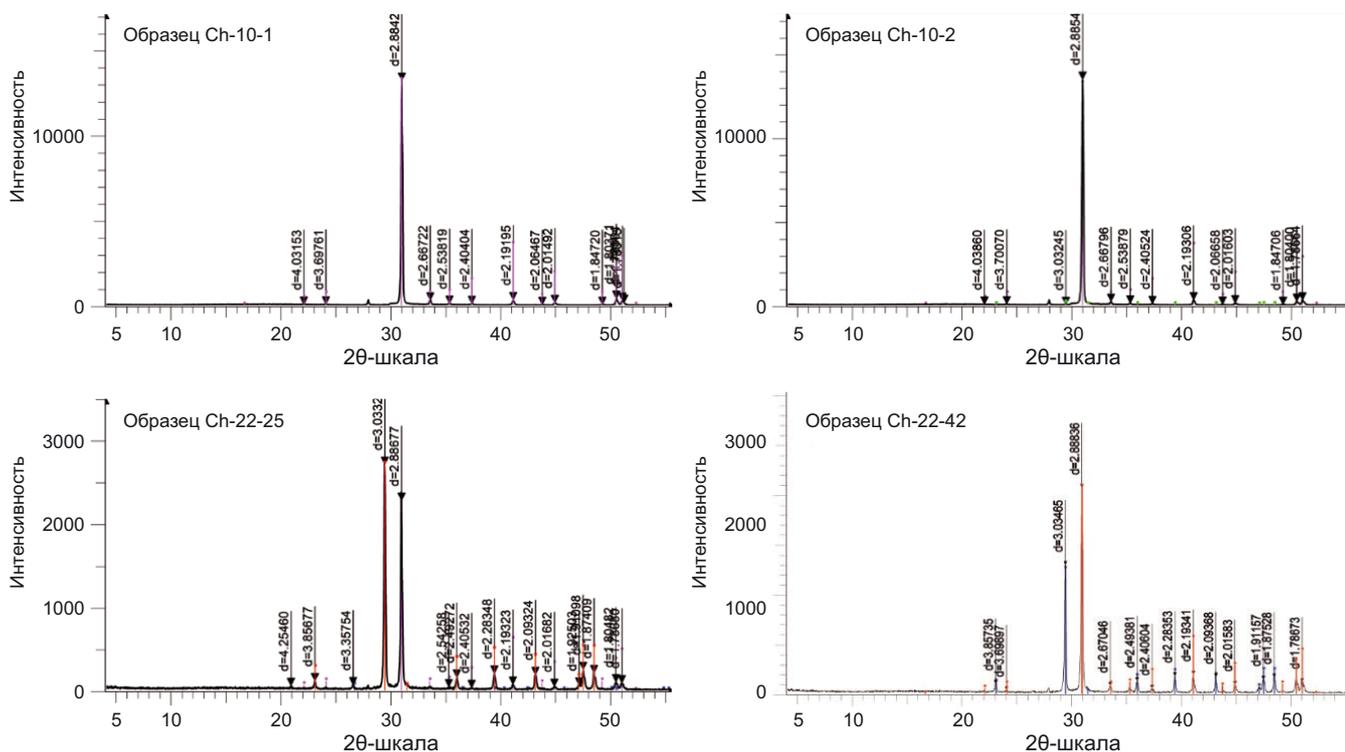


Рис. 9. Дифрактограмма карбонатных пород-коллекторов – результаты полуколичественного рентгенофазового анализа кристаллических фаз.

Образец Ch-10-1: доломит $CaMg(CO_3)_2$ – 99.0 %, рентгеноаморфные примеси – 1 %. Образец Ch-10-2: доломит $CaMg(CO_3)_2$ – 99.2 %, кальцит $Ca(CO_3)$ – 0.8 %. Образец Ch-22-25: кальцит $Ca(CO_3)$ – 53.9 %, доломит $CaMg(CO_3)_2$ – 44.9 %, кварц SiO_2 – 1.2 %. Образец Ch-22-42: доломит $CaMg(CO_3)_2$ – 62.3 %, кальцит $Ca(CO_3)$ – 37.7 %.

Fig. 9. Diffraction patterns of carbonate reservoir rocks – results of semi-quantitative X-ray phase analysis of crystalline phases. Sample Ch-10-1: dolomite $CaMg(CO_3)_2$ – 99.0 %, X-ray amorphous impurities 1 %. Sample Ch-10-2: dolomite $CaMg(CO_3)_2$ – 99.2 %, calcite $Ca(CO_3)$ – 0.8 %. Sample Ch-22-25: calcite $Ca(CO_3)$ – 53.9 %, dolomite $CaMg(CO_3)_2$ – 44.9 %, quartz SiO_2 – 1.2 %. Sample Ch-22-42: dolomite $CaMg(CO_3)_2$ – 62.3 %, calcite $Ca(CO_3)$ – 37.7 %.

Присутствие кальцита в образце прослежено по эндотермической реакции, температурные пределы которой совпали с этапом разложения кальциевого компонента доломита. Количество высвободившейся двуокиси углерода при диссоциации CaCO_3 определено из разницы потери веса, регистрируемой в интервале 705–825 °С, и потери веса кальцитом в этом же промежутке температур. После корректировочных процедур по упорядочиванию величин термогравиметрических параметров (см. рис. 7) потеря веса кальцита составила 12.5 % (CO_2). С учетом этой величины и согласно стехиометрической формуле CaCO_3 содержание кальцита в составе образца составило 28.4 %.

Термическая диссоциация магнезита протекала совместно со сгоранием присутствующего в образце органического вещества (ОВ), т.е. в промежутке температур убывания веса – Δm_2 . Доля выброшенного магнезитом CO_2 составила 1.375 %, что соответствует наличию в пробе 2.6 % данного карбоната. Остальная же часть потери веса (10 %) вызвана выбросом из системы оксида углерода при сгорании органического соединения.

Рентгенометрические данные исследуемого образца указывают на то, что исследуемая порода состоит из доломита – 99.2 % и только 0.8 % приходится на кальцит (рис. 9). Регистрация в пробе такого плохо окристаллизованного кальцита методом РФА затруднена.

Для контроля минерального и вещественного состава этой породы, идентифицированных методами РФА, ДТА и TGA, были использованы данные элементного состава образцов, выполненных на электронно-зондовом микроанализаторе.

Приведенные данные электронно-зондового микроанализа по элементному, оксидному и карбоновому содержанию породы соответствуют составу минералов, установленных рентгеновской дифрактометрией и комплексом термического анализа. Полученные результаты вполне приемлемы для выявления степени совершенства кристаллических структур карбонатных минералов и могут быть использованы для выяснения механизма накопления и миграции углеводородных комплексов в осадочных толщах изучаемого массива.

Известняк, взятый из соседней скважины на глубине 4390.9 м, представляет собой агрегат кальцита с примесями карбонатов магния. Об этом свидетельствуют результаты термического анализа порошковой пробы изучаемого зерна. Динамическое нагревание указанного образца привело к формированию на кривых ДТА, DTG, и TG ряда проявлений, обусловленных термической деструкцией кальцита и в меньшей степени доломита и магнезита (см. рис. 8). Наряду с указанными реакциями термические кривые обнаружили слабо выраженные выбросы из системы воды и органического оксида углерода, снизившие вес образца соответственно на 0.5 и 0.6 %. Термическое поведение другой пробы несколько отличается от процессов разложения предыдущего зерна. Такое отличие проявляется в отсутствии на ДТА-кривой изучаемой

системы эндотермического пика, отвечающего за режим деструкции магниевой составляющей (MgCO_3) доломита. Взамен указанного пика ДТА- и DTG-кривые регистрируют в пределах 600–675 °С незначительный прогиб, свидетельствующий о развитии в образце слабо выраженной реакции разложения указанного магниевых компонента доломита. При этом термогравиметрическая (TG) кривая в промежутке отмеченных температур регистрирует падение веса образца (Δm_4) на 2.1 %. Такое же снижение массы образца (2.1 %) доломит осуществляет в пределах 675–710 °С. В интервале температур 675–860 °С с доломитом одновременно разлагается кальцит (см. рис. 7). Используя стехиометрическую формулу $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ и количество выброшенного в атмосферу диоксида углерода (2·21.1 %), нетрудно подсчитать содержание доломита в системе. Его количество в породе составляет 8.8 %. По результатам потери веса образца при эндотермических реакциях в областях 460 и 830 °С было подсчитано наличие в пробе 5.7 % магнезита и 83.9 % кальцита соответственно. Содержание воды и ОВ в составе образца определялось по ступеням потери веса в интервалах температур 20–200 и 200–460 °С соответственно (см. рис. 8).

Высокая концентрация кальцита (83.9 %) в составе образца позволила определить кинетические константы термической диссоциации данного карбоната. С помощью методики [Ivanova et al., 1974; Samatov, Urumbaev, 1997] была подсчитана энергия активации (E_A) выброса из системы диоксида углерода. В процессе деструкции $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ указанный параметр составил 250 кДж/моль, что соответствует высокой степени совершенства кристаллической структуры данного кальцита.

Кинетическими расчетами установлено также, что модульное значение E_A изучаемых карбонатов находится в прямой зависимости от величины свободной энергии их структуры. С учетом этой закономерности и неравенства E_A (кальцита) > E_A (доломита) следует, что направленность преобразования минералов в кальцит-доломитовых системах во многом зависит от энергетических уровней их кристаллических структур, а затем от геохимической обстановки окружающего пространства. Изучение образцов подтвердило указанное неравенство. В свою очередь, энергетический параметр E_A доломита сложен из энергии активации кальциевого компонента [$E_{A1}(\text{CaCO}_3)$] и ее магниевой составляющей [$E_{A1}(\text{MgCO}_3)$], т.е. выполняется равенство E_A (доломита) = $E_{A1}(\text{CaCO}_3) + E_{A1}(\text{MgCO}_3)$.

Здесь видно, что энергетический уровень кристаллической решетки мономинерального кальцита выше, чем уровень, в котором расположен доломит. В связи с этим, согласно правилу Оствальда об энергетической предпочтительности перехода одной минеральной системы в другую [Coats, Redfern, 1964], превращение кальцита в доломит более вероятно, чем преобразование, происходящее в обратном направлении. Это означает, что в процессе развития новой фазы частичное

замещение в трансформируемом кальците катиона Са на Mg менее затруднено, чем замещение доломитом магния на кальций. Данный вывод справедлив и для соответствующих карбонатов ЧМ. Сам процесс превращения кальцита в доломит в осадочных отложениях совместно с внедрением в карбоновые комплексы глинистых минералов можно отнести к одним из важных этапов формирования коллекторов и поровых пространств в карбонатных толщах с высокими емкостными и фильтрационными свойствами [Tsvetkov et al., 1964]. Далее следует, что для деструкции CaCO_3 (минерала) требуется больше затрат энергии, чем для разрушения структуры доломита. Такое заключение (о направленности формирования минеральных фаз в кальцит-доломитовых толщах) может быть использовано для выявления зависимости продуктивных свойств коллекторов не только от состава карбонатно-глинистых комплексов, но и от степени превращения в этих ассоциациях кальцита в доломит.

Следует отметить, что минеральный состав в указанной породе по данным РФА несколько отличается от вещественного содержания, представленного термическим анализом. И это естественно, поскольку рентгеновская дифрактометрия дает содержание минералов лишь от кристаллической части пробы, тогда как термогравиметрическая методика определения минерального состава производится относительно всей массы исследуемого вещества, т.е. относительно кристаллической и аморфной части образца. Кроме того, присутствие в исследуемой системе различных солей и термически инертных дисперсных образований может частично изменить кинетику термического разложения карбонатов, что также приводит к помехам достоверного определения количественного содержания минеральных фаз [Putnis, McConnell, 1980; Samatov, Urumbaev, 1997].

Порода, представляющая собой нижний стратиграфический уровень (5320 м) в скважине, при нагревании в режиме непрерывного роста температуры оставила на термических кривых серию проявлений эндо- и экзотермической направленности (см. рис. 8). ДТА и DTG кривые в интервале 625–825 °С оформили свои траектории в виде W-образного искривления, которое соответствует эндотермическим пикам термического разложения доломита. Глубины указанных пиков при диссоциации $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ обычно одинаковы. Но в рассматриваемом случае величина второго пика (при 830 °С) несколько превышает величину первого, что обусловлено наличием в составе доломитового образования кальцита, эндотермический пик которого также расположен при 830 °С. По TG-кривой было установлено, что при диссоциации доломита в атмосферу устремляется (в два этапа) серия молекул CO_2 с массой 28.4 %, соответствующей потере веса образца в рассматриваемом промежутке температур. В свою очередь, при разложении кальцита выброс диоксида углерода приводит к снижению веса образца еще на 12.9 %. На основе этих значений для подсчета минерального

содержания породы по TG-определениям и стехиометрическим формулам было установлено наличие в составе образца доломита – 59.5 %, кальцита – 29.3 %. Согласно термическим эффектам, зафиксированным на ДТА-кривой в пределах 20–220 °С, было обнаружено обезвоживание пробы с потерей веса, равной 0.2 %, а в интервале 220–640 °С была установлена реакция выгорания органического вещества ($\text{CO}_{\text{орг}}$) с понижением массы образца на 2.2 %. На этой же кривой отмечен явно выраженный экзотермический пик с вершиной при 440 °С. Эффект вызван окислением пирита с образованием гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) [Ivanova et al., 1974]. Количество указанного сульфида (FeS_2), подсчитанное по площади пика, соответствует 2 %. Присутствие магнетита в пробе было обнаружено по слабому эндотермическому провалу ДТА-кривой, в интервале 550–640 °С. В пределах этих температур TG-линия зафиксировала потерю веса образца, равную 2.5 %, что соответствует наличию в нем 4.8 % магнетита.

Результаты рентгеноструктурного анализа изучаемого образца отражены на дифрактограмме (рис. 9). Все приведенные здесь дифракционные пики принадлежат только указанным выше фазам. Также отмечены характерные дифракционные рефлексы, позволяющие провести идентификацию присутствующих фаз. Контрольные результаты исследования элементного состава породы, выполненного на электронно-зондовом микроанализаторе, также выявили соответствие минерального состава образца, полученного методами РФА и ДТА в рамках их возможностей.

Следует заметить, что при всем многообразии вещественного состава пород, которые представлены карбонатами, глинами, кремнистыми образованиями и прочими примесями, в исследуемых пяти скважинах также обнаружено органическое вещество. В известняках, где количество кальцита превышало 96 %, содержание органического соединения варьировалось в пределах 0.3–0.7 %. В других же породах, в которых наряду с кальцитом присутствовал доломит, магнетит, сидерит в соседстве с минералами слоистых силикатов и оксидов кремния, концентрация органического вещества достигала 13 %. Повышенное содержание органического вещества в указанных породах вызвано наличием в них более широкого круга карбонатно-глинистых минералов и оксидов кремния, необходимых для формирования в толщах коллекторов поровых пространств.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Северная бортовая часть Прикаспийского бассейна изучена при геологоразведочных работах с широким применением комплекса глубокого бурения и современных методов геофизических исследований, особенно сейсмике, с последующей обработкой полученных данных по новейшим технологиям в области программного обеспечения [Kuandykov et al., 2011; Akchulakov et al., 2014; Votsalevskiy et al., 2016; Iskaziev et al., 2019, 2020].

В узкой Прибортовой полосе подсолевые отложения достаточно быстро погружаются на глубину от 4–5 до 6–7 км [Kuandykov et al., 2011; Iskaziev et al., 2019, 2020]. По данным сейсмоки в Прибортовой полосе согласно рис. 4.4 из монографии [Kuandykov et al., 2011] и рис. 3, 5 из работы [Iskaziev et al., 2020] в подсолевом комплексе выделены разломы, образующие пары, плоскости сместителей которых падают разнонаправленно под углами 70–75° и проникают в вышележащий карбонатный шлейф в виде флексур и разрывов. Такие разломы образуют антитетические пары (в понимании Г. Клоосса) [Cloos, 1935]. В другом случае согласно рис. 6 из работы [Iskaziev et al., 2020] плоскости сместителей разломов наклонены под углом 75° на юго-восток, развиты в палеозойском комплексе (кембрий – силур), также формируют антитетическую серию разломов, которые проникают в вышележащий карбонатный комплекс (девон – карбон), и разрывов, переходящих во флексурные изгибы.

Разрывные структуры подсолевого комплекса, вероятно, воздействуют на солевой комплекс, отчасти инициируя развитие солевых диапиров [Ramberg, 1985; Filippov et al., 2009; Kontorovich et al., 2014; Lunev, Abramov, 2014; Lunev et al., 2014, 2023; Lapkovsky et al., 2021, 2023]. В работе [Kuandykov et al., 2011] имеется ряд примеров разломного воздействия протерозойского фундамента и палеозойского комплекса (кембрий – силур) на вышележащие осадочные образования.

Гигантское нефтегазоконденсатное месторождение Карачаганак залегает в нижнепермской – каменноугольной – верхнедевонской карбонатной биогермной платформе. Здесь широко развиты коллекторы порово-кавернового и трещинного типа [Tsvetkov et al., 1964; Fortunatova et al., 2021].

Анализ литературных источников некоторых нефтегазоносных площадей мира позволяет провести их сравнительную характеристику с Северо-Западной Прибортовой зоной Прикаспийского бассейна в районе нефтегазовых месторождений ЧМ и Лободинско-Тепловской группы.

В Таримском и Сычуаньском бассейнах Китая диагенетические и наложенные на них деформационные преобразования (наличие тектонической трещиноватости и катаклаза), а также карстовые процессы определяют облик карбонатных коллекторов этих бассейнов. Результаты этих работ аргументированы и обоснованы современными методами микроскопических, аналитических и петрофизических исследований. В Сычуаньском бассейне Китая в карбонатных коллекторах большую роль играют широко проявленные тектонические трещины сдвига, которые являются преобладающими типами трещин, влияющими на свойства коллекторов. Распространение и развитие сдвиговых трещин сколового типа в основном контролируются литологией, механическими слоями и разломами [Yang et al., 2020; Jiu et al., 2022; Shi et al., 2022].

В Северо-Западной Прибортовой зоне в районе ЧМ и Лободинско-Тепловской группы месторождений, рас-

положенных над выступом протерозойского фундамента, выделено два генетических типа коллекторов: 1) поровые и порово-каверновые, 2) трещинно-разломные. Установлено, что для органогенных известняков характерны процессы перекристаллизации, доломитизации, замещения, выщелачивания и вторичного минерального образования. На фотографиях шлифов показаны различные типы органогенно-комковатых известняков в различной степени перекристаллизации и доломитизации (см. рис. 7). Различные стадии перекристаллизации прослеживаются в шлифах органогенных известняков, фотографии которых представлены на рис. 7, где перекристаллизации подверглись цемент и скелет остатков организмов, однако они сохранили свою форму. При дальнейшей перекристаллизации реликты первичной органогенно-комковатой структуры сохраняются в виде характерного распределения кристаллов различных размеров [Ronchi et al., 2010].

Стадийность проявления постседиментационных и последующих деформационных процессов видна на рис. 7, где она выражена следующей последовательностью: неполная перекристаллизация первичной кальцитовой массы, далее неравномерная доломитизация, затем выщелачивание неизмененного остаточного кальцита и заполнение межкристаллических пор ангидритом и несколько позже выборочное выщелачивание породы с образованием пустот нескольких сантиметров.

В фамен-каменноугольных карбонатных породах прослежены деформационные минеральные, текстурно-структурные преобразования, выраженные в перекристаллизации карбонатов и возникновении вторичного трещинно-порового пространства пород. Главными пороодообразующими минералами являются кальцит, доломит и магнезит. Второстепенные минералы представлены сидеритом, родохрозитом, манганокальцитом, глинистыми образованиями (каолинит, гидрослюда, смешанно-слоистые минералы), сульфидами железа, оксидами кремния магнезия, кальция.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований выполнена оценка деформационного воздействия на карбонатные породы Северо-Западной Прибортовой разломной зоны Прикаспийского бассейна.

Окончательное становление коллекторских свойств фамен-турнейских пород произошло в результате длительного дислокационного воздействия СЗПЗ Прикаспийского бассейна, что привело к формированию катаклазитов и тектонической трещиноватости (отрыва и скола), а также активизации процессов выщелачивания и вторичного минералообразования. Тектоническая трещиноватость, стилолитизация и выщелачивание способствовали возрастанию проницаемости и пористости карбонатных пород. Напротив, процессы перекристаллизации, доломитизации и сульфатизации оказали негативное влияние, ухудшив коллекторские свойства пород.

По результатам рентгеновской дифрактометрии (X-ray), термического анализа (DTA, TGA), зондового микроанализа и комплексного микроскопического изучения фамен-турнейских карбонатных пород определена степень деформационного преобразования минерального и вещественного состава искомого субстрата. Породы сложены преимущественно формами кальцита, имеющими разную степень совершенства своих кристаллических решеток, доломитами с умеренно упорядоченными структурами и магнезитами со слабо развитыми связями диоксида углерода в межмолекулярном пространстве. В результате сравнения энергии активации $[E_{A1}(\text{CaCO}_3)]$ разложения кальцитовой части доломита с энергией активации $E_{A2}(\text{CaCO}_3)$, относящегося к диссоциации собственно кальцита, было выявлено, что величина $E_{A2}(\text{CaCO}_3)$ превышает значения $E_{A1}(\text{CaCO}_3)$. Расчеты показали также, что энергия активации разложения кальцийсодержащего компонента $[E_{A1}(\text{CaCO}_3)]$ доломита выше энергии активации магниевой составляющей доломита. Интерпретация этих данных показала, что в исследуемых карбонатных толщах трансформация кальцита в доломит инициирована деформационными процессами. Результаты X-ray, DTA и TGA измерений и данные зондового микроанализа позволили выявить в составе карбонатов термически инертные образования в качестве оксидов кальция, магния, кремния, железа и других соединений, накопленных в процессе преобразования карбонатов.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность руководству АО «Казахстанско-Британский технический университет», а также рецензентам за ценные советы и критические замечания.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abilkhasimov Kh.B., 2021. Typification of Sections of the Paleozoic Complex of the Eastern Side of the Caspian Depression. *Oil and Gas* 1 (121), 6–24 (in Russian) [Абилхасимов Х.Б. Типизация разрезов палеозойского комплекса восточного борта Прикаспийской впадины // Нефть и газ. 2021. № 1 (121). С. 6–24]. <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2021-1.01>.

Akchulakov U.A., Zholtayev G.Zh., Iskaziyeu K.O., Kovrizhnyh P.N., Kuandykov B.M., Ogay Y.K., 2014. Atlas of Oil and Gas Bearing and Prospective Sedimentary Basins of the Republic of Kazakhstan. Astana, 97 p. (in Russian) [Акчулаков У.А., Жолтаев Г.Ж., Исказиев К.О., Коврижных П.Н., Куандыков Б.М., Огай И.К. Атлас нефтегазоносных и перспективных осадочных бассейнов Республики Казахстан. Астана, 2014. 97 с.].

Bagrintseva K.I., Dmitrievsky A.N., Bochko R.A., 2003. Atlas of Carbonate Reservoirs of Oil and Gas Fields of the East European and Siberian Platforms. Moscow, 264 p. (in Russian) [Багринцева К.И., Дмитриевский А.Н., Бочко Р.А. Атлас карбонатных коллекторов месторождений нефти и газа Восточно-Европейской и Сибирской платформ. М., 2003. 264 с.].

Cloos H., 1935. Mapping the Basement in SW Africa. *Geologische Rundschau* 26, 241.

Coats A.W., Redfern J.P., 1964. Kinetic Parameters of Thermogravimetric Data. *Nature* 201, 68–69. <https://doi.org/10.1038/201068a0>.

Cohen K.M., Finney S.C., Gibbard P.L., Fan J.X., 2024. The ICS International Chronostratigraphic Chart. Available from: <https://stratigraphy.org/chart> (Last Accessed January 15, 2025).

Daukeev S.Zh., Uzhkenov B.S., Abdulin A.A., Bespaev H.A., Votsalevskiy E.S., Ljubetsky V.N., Mazurov A.K., Miroshnichenko L.A., 2002. Deep Structure and Mineral Resources of Kazakhstan. Vol. 3: Oil and Gas. Almaty, 248 p. (in Russian) [Даукеев С.Ж., Ужкенов Б.С., Абдулин А.А., Беспеев Х.А., Воцалевский Э.С., Любецкий В.Н., Мазуров А.К., Мирошниченко Л.А. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана. Т. 3: Нефть и газ. Алматы, 2002. 248 с.].

Demeeva M.S., 2020. Features of the Formation of Carbonate Reservoirs at the Chinarevskoye Field. In: Engineering Solutions in the Oil and Gas Industry of Kazakhstan. Collection of Works of JSC NIPIneftegaz. Iss. 6. Aktau, p. 130–135 (in Russian) [Демеева М.С. Особенности формирования карбонатных коллекторов на месторождении Чинаревское // Инжиниринговые решения в области нефтегазовой индустрии Казахстана: Сборник трудов АО «НИПИнефтегаз». Актау, 2020. Вып. 6. С. 130–135].

Filippov Yu.F., Lapkovskii V.V., Lunev B.V., 2009. Numerical Modeling of Salt Tectogenesis in the Cambrian Deposits of the Cis-Yenisei Sedimentary Basin (PR₃–Pz) (West Siberia). *Russian Geology and Geophysics* 50 (2), 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.08.001>.

Fortunatova N.K., Varlamov A.I., Kanev A.S., Poroskun V.I., Baranova A.V., Bushueva M.A., 2021. Structure and Assessment of the Oil Potential of Carbonaceous Carbonate-Siliceous Domanik Deposits in the Volga-Ural Oil and Gas Province. *Russian Geology and Geophysics* 62 (8), 929–946. <https://doi.org/10.2113/RGG20214351>.

Iskaziyeu K.O., 2019. Conceptual Sedimentological Model of Clastic-Carbonate Frasnian Section on Chinarevskoye Field (Kazakhstan). *Oil Industry* 10, 14–18 (in Russian) [Исказиев К.О. Концептуальная седиментологическая модель франских терригенно-карбонатных отложений

Чинаревского месторождения (Казахстан) // Нефтяное хозяйство. 2019. № 10. С. 14–18]. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-10-14-18>.

Iskaziev K.O., Khafizov S.F., Lyapunov Yu.V., Almazov D.O., Savinova L.A., Antipov M.P., 2019. Late Paleozoic Organogenic Structures of the Kazakhstan Segment of the Caspian Basin. Lenand, Moscow, 250 p. (in Russian) [Исказиев К.О., Хафизов С.Ф., Ляпунов Ю.В., Алмазов Д.О., Савинова Л.А., Антипов М.П. Позднепалеозойские органогенные постройки казахстанского сегмента Прикаспийской впадины. М.: Ленанд, 2019. 250 с.].

Iskaziev K.O., Matloshinskiy N.G., Khafizov S.F., 2020. Caspian Depression: New Prospects North Board Area. Oil and Gas 1 (115), 6–16 (in Russian) [Исказиев К.О., Матлошинский Н.Г., Хафизов С.Ф. Прикаспийская впадина: новые перспективы Северной бортовой зоны // Нефть и газ. 2020. № 1 (115). С. 6–16].

Ivanova V.P., Kasatov B.K., Krasavina T.N., Rozinov E.L., 1974. Thermal Analysis of Minerals and Rocks. Nedra, Leningrad, 399 p. (in Russian) [Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розинов Е.Л. Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 1974. 399 с.].

Jiu B., Huang W., Mu N., Hao R., 2022. Petrology, Mineralogy and Geochemistry of Ordovician Rocks in the Southwest of Tarim Basin, Implications for Genetic Mechanism and Evolution Model of the Hydrothermal Reformed-Paleokarst Carbonate Reservoir. Marine and Petroleum Geology 140, 105687. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105687>.

Kontorovich V.A., Lunev B.V., Lapkovsky V.V., Filippov Yu.F., 2014. Numerical Models of the Formation of Salt Tectonics Structures Identified by Seismic Exploration in the Cambrian Deposits of the Cis-Yenisei Sedimentary Basin (Southeast of Western Siberia). Geology and Mineral Resources of Siberia 2, 105–115 (in Russian) [Конторович В.А., Лунёв Б.В., Лапковский В.В., Филиппов Ю.Ф. Численные модели формирования структур соляной тектоники, выявленных сейсморазведкой в кембрийских отложениях Предъенисейского осадочного бассейна (юго-восток Западной Сибири) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 2. С. 105–115].

Korobkin V.V., Samatov I.B., Tulemissova Zh.S., Chaklikov A.E., Abdirakhmanov A., 2023. Method for Quantitative Determination of Secondary Calcite. Utility Model Patent No. 8623. Republic of Kazakhstan (in Russian) [Коробкин В.В., Саматов И.Б., Тулемисова Ж.С., Чакликов А.Е., Абдирахманов А. Способ количественного определения вторичного кальцита: Патент на полезную модель № 8623. Республика Казахстан, 2023].

Kuandykov B.M., Matloshinsky N.G., Sentgiorgi K., Kovach A., Trokhimenko M.S., Eskozha B., Milota K., Fogarashi A. et al., 2011. Oil and Gas Content of the Paleozoic Shelf Margin of the North of the Precaspian Depression. Gylym, Almaty, 280 p. (in Russian) [Куандыков Б.М., Матлошинский Н.Г., Сентгиорги К., Ковач А., Трохищенко М.С., Ескожа Б., Милота К., Фогараша А. и др. Нефтегазоносность палеозойской шельфовой окраины севера Прикаспийской впадины. Алматы: Гылым, 2011. 280 с.].

Lapkovsky V.V., Lunev B.V., Antipov M.P., Volozh Yu.A., Pisarenko Yu.A., 2021. Structure of Subsalt Layers According to Detailed Drilling Data in the Northern Caspian. In: New Challenges of Fundamental and Applied Geology of Oil and Gas – XXI Century. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with the Participation of Foreign Scientists, Dedicated to the 150th Anniversary of the Academician of the USSR Academy of Sciences I.M. Gubkin and the 110th Anniversary of the Academician of the USSR Academy of Sciences and the Russian Academy of Sciences A.A. Trofimuk (September 14–15, 2021). Novosibirsk State University Publishing House, Novosibirsk, p. 33–35 (in Russian) [Лапковский В.В., Лунев Б.В., Антипов М.П., Волож Ю.А., Писаренко Ю.А. Структура подсолевых слоев по данным детального бурения в Северном Прикаспии // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век: Материалы Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых, посвященной 150-летию академика АН СССР И.М. Губкина и 110-летию академика АН СССР и РАН А.А. Трофимука (14–15 сентября 2021 г.). Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. С. 33–35]. <https://doi.org/10.25205/978-5-4437-1248-2-33-35>.

Lapkovsky V.V., Lunev B.V., Antipov M.P., Volozh Yu.A., Pisarenko Yu.A., Fomina V.V., 2023. 3D Modeling of Salt Domes According to Detailed Drilling Data in the Precaspian Region. Georesources 25 (4), 192–202 (in Russian) [Лапковский В.В., Лунев Б.В., Антипов М.П., Волож Ю.А., Писаренко Ю.А., Фомина В.В. Трехмерное моделирование солянокупольных структур по данным детального бурения в Прикаспии // Георесурсы. 2023. Т. 25. № 4. С. 192–202]. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.4.18>.

Lunev B.V., Abramov T.V., 2014. Modeling of Salt Diapirism by Calculation of 3D Creeping Flow with Parallel Computing on GPU with CUDA. Interexpo Geo-Siberia-2014. Proceedings of the X International Congress and Exhibition (April 8–18, 2014). Vol. 4. Iss. 2. P. 148–152 (in Russian) [Лунев Б.В., Абрамов Т.В. Моделирование соляного диапиризма расчетом 3d ползущих течений с использованием технологии параллельных вычислений CUDA на GPU // Интерэкспо Гео-Сибирь-2014: Материалы X международного конгресса и выставки (8–18 апреля 2014 г.). 2014. Т. 4. № 2. С. 148–152.]

Lunev B.V., Lapkovsky V.V., Abramov T.V., 2014. Numerical Modeling of Inversion Folding in Subsalt Layers. Interexpo Geo-Siberia-2014. Proceedings of the X International Congress and Exhibition (April 8–18, 2014). Vol. 4. Iss. 2. P. 153–157 (in Russian) [Лунев Б.В., Лапковский В.В., Абрамов Т.В. Численное моделирование развития инверсионных складок в подсолевых слоях // Интерэкспо Гео-Сибирь-2014: Материалы X международного конгресса и выставки (8–18 апреля 2014 г.). 2014. Т. 4. № 2. С. 153–157].

Lunev B.V., Lapkovsky V.V., Antipov M.P., Volozh Y.A., Postnikova L.S., 2023. Influence of the Evaporite Formation Structure on Salt Tectonics and Hydrocarbon Traps (By the Results of Numerical Simulation of Halokinesis in the Precaspian). Geodynamics & Tectonophysics 14 (2), 0690 (in

Russian) [Лунёв Б.В., Лапковский В.В., Антипов М.П., Волож Ю.А., Постникова И.С. Влияние строения эвапоритовой формации на формирование структур соляной тектоники и ловушек углеводородов (по результатам численного моделирования галокинеза в Прикаспии) // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 2. 0690]. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-2-0690>.

Matloshinsky N.G., 2017. Additional Prospects of Oil and Gas Potential of North Peri-Caspian Depression. *Oil and Gas* 4 (100), 36–45 (in Russian) [Матлошинский Н.Г. Перспективы нефтеносности северной бортовой зоны Прикаспийской впадины // Нефть и газ. 2017. № 4 (100). С. 36–45].

Mitchell J., 1956. A Note on a Method of Staining to Distinguish Between Calcite and Dolomite. In: E.H. Beard (Ed.), *Colonial Geological and Mineral Resources: The Quarterly Bulletin of the Colonial Geological Surveys*. Vol. 6. No. 2. Her Majesty's Stationery Office, London, p. 182–183.

Putnis A., McConnell J.D.C., 1980. *Principles of Mineral Behaviour*. Blackwell, Oxford, 270 p.

Ramberg H., 1985. Gravity and Deformation in the Earth's Crust. *Nedra*, Moscow, 399 p. (in Russian) [Рамберг Х. Сила тяжести и деформации в земной коре. М.: Недра, 1985. 399 с.].

Ronchi P., Ortenzi A., Borromeo O., Claps M., Zempolich W.G., 2010. Depositional Setting and Diagenetic Processes and Their Impact on the Reservoir Quality in the Late Visean-Bashkirian Kashagan Carbonate Platform (Pre-Caspian Basin, Kazakhstan). *AAPG Bulletin* 94 (9), 1313–1348. <https://doi.org/10.1306/01051009130>.

Samatov I.B., Urumbaev B.U., 1997. Thermochemical Features of Calcite-Dolomite Formations (On the Example of Central Kazakhstan). In: *Geology of Kazakhstan*. Iss. 2. Gylym, Alma-Ata, p. 49–56 (in Russian) [Саматов И.Б., Урумбаев Б.У. Термохимические особенности кальцит-доломитовых образований (на примере Центрального Ка-

захстана) // Геология Казахстана. № 2. Алматы: Гылым, 1997. С. 49–56].

Shi J., Zhao X., Pan R., Zeng L., Luo W., 2022. Natural Fractures in the Deep Sinian Carbonates of the Central Sichuan Basin, China: Implications for Reservoir Quality. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 216, 110829. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110829>.

Tsvetkov A.I., Valyashikhina E.P., Piloyan G.O., 1964. *Differential Thermal Analysis of Carbonate Minerals*. Nauka, Moscow, 167 p. (in Russian) [Цветков А.И., Вальяшихина Е.П., Пилоян Г.О. Дифференциальный термический анализ карбонатных минералов. М.: Наука, 1964. 167с.].

Votsalevskiy E.S., Bulekbaev Z.E., Iskuzhiev B.A., Kamalov S.M., Korstyshevsky M.N., Kuandykov B.M., Kuantaev N.E., Marchenko O.N. et al., 2016. *Oil & Gas Fields of Kazakhstan. Reference Book*. 3rd Ed. Almaty, 409 p. (in Russian) [Воцалевский Э.С., Булекбаев З.Е., Искужиев Б.А., Камалов С.М., Корстышевский М.Н., Куандыков Б.М., Куантаев Н.Е., Марченко О.Н. и др. Месторождения нефти и газа Казахстана: Справочник. 3-е изд. Алматы, 2016. 409 с.].

Yang L., Yu L., Chen D., Liu K., Yang P., Li X., 2020. Effects of Dolomitization on Porosity During Various Sedimentation-Diagenesis Processes in Carbonate Reservoirs. *Minerals* 10 (6), 574. <https://doi.org/10.3390/min10060574>.

Zholtaev G.Zh., Nikitina O.I., Zhaimina V.Ya., Seitmuratova E.Yu., Pirogov T.E., Ivanova N.I., Fazylov E.M., Musina E.S., Nigmatova S.A., Baishashov B.U., 2021. Modernization of the Phanerozoic Stratigraphic Schemes of Kazakhstan Based on the International Chronostratigraphic Scale – 2016–2021. *LPP "378"*, Almaty, 139 p. (in Russian) [Жолтаев Г.Ж., Никитина О.И., Жаймина В.Я., Сейтмуратова Э.Ю., Пирогова Т.Е., Иванова Н.И., Фазылов Е.М., Мусина Э.С., Нигматова С.А., Байшашов Б.У. Модернизация стратиграфических схем фанерозоя Казахстана на основе Международной хроностратиграфической шкалы – 2016–2021. Алматы: ТОО «378», 2021. 139 с.].