

УДК 552.5

DOI: 10.24930/1681-9004-2025-25-4-748-771

Комплекс преобразований терригенных и карбонатных отложений укской свиты верхнего рифея Южного Урала в стратотипическом разрезе (р. Юрюзань, г. Усть-Катав)

С. А. Дуб, Л. В. Бадида, О. Ю. Мельничук, Л. В. Леонова

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mails: sapurins@gmail.com; kokshina.lv@gmail.com;
o.u.melnichuk@gmail.com; lvleonova@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.02.2025 г., принята к печати 14.07.2025 г.

Объект исследования. Установлены и изучены продукты эпигенетических преобразований карбонатных и терригенных пород укской свиты верхнего рифея Башкирского мегантиклинория в стратотипическом разрезе (р. Юрюзань у г. Усть-Катав). **Материал и методы.** Методом рентгеноструктурного анализа определен минеральный состав отложений, породы изучены в шлифах под поляризационным микроскопом, отдельные образцы исследованы с помощью электронного микроскопа. Для оценки характера вторичных изменений задействован стадийный анализ. **Результаты.** Получены данные о последовательности и интенсивности преобразований как терригенных, так и карбонатных отложений. Все эпигенетические изменения пород укской свиты подразделены на градационные (эпигенез прогрессивный/погружения) и наложенные/флюидотектонические (эпигенез наложенный). К градационным отнесены фоновые преобразования, связанные с изменением термобарических условий в течение геологического времени, а также аутигенный собственный минералогенез. В число наложенных включены аутигенный наложенный/чужеродный минералогенез (метасоматоз и заполнение пустот), образование пустот и преобразования, связанные с локальными изменениями температуры и давления. Наложенные процессы (главным образом метасоматоз) были типичны для отложений, изначально обладающих высокой проницаемостью: песчаников тонкозернистых, известняков оолитовых, интракластовых и некоторых строматолитовых – они характеризуются богатством продуктов эпигенеза, взаимоотношения между которыми позволяют судить о последовательности протекавших процессов. **Выводы.** Комплекс структурно-минералогических признаков пород свидетельствует о градационных преобразованиях на уровне начала позднего катагенеза, что близко к литературным данным по геохимии органического вещества, указывающим на достижение отложениями мезокатагенеза. Завершение прогрессивного эпигенеза, скорее всего, обусловлено формированием Уральского орогена в позднем палеозое. Совокупность вторичных изменений свидетельствует о существенном влиянии наложенных эпигенетических процессов на осадочную последовательность, но в основном только в пределах пачек или пластов, которые могли служить проводниками флюидов.

Ключевые слова: гетерогенная осадочная последовательность, петрография, стадийный анализ, эпигенез, катагенез, градационные и наложенные преобразования, аутигенное минералообразование, метасоматоз

Diagenesis of siliciclastic and carbonate deposits of the Neoproterozoic Uk Formation in the stratotype section (Southern Urals, Yuryuzan river, Ust-Katav town)

Semyon A. Dub, Lyudmila V. Badida, Oleg Yu. Melnichuk, Lyubov' V. Leonova

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st.,
Ekaterinburg 620110, Russia, e-mails: sapurins@gmail.com; kokshina.lv@gmail.com;
o.u.melnichuk@gmail.com; lvleonova@yandex.ru

Received 18.02.2025, accepted 14.07.2025

Research subject. The products of epigenetic transformations of carbonate and siliciclastic rocks in the stratotype section of the Upper Riphean Uk Formation (Yuryuzan River near Ust-Katav) in Bashkirian Mega-anticlinorium were identified and studied. **Material and methods.** The mineral composition of deposits was determined by X-ray diffraction analysis,

Для цитирования: Дуб С.А., Бадида Л.В., Мельничук О.Ю., Леонова Л.В. (2025) Комплекс преобразований терригенных и карбонатных отложений укской свиты верхнего рифея Южного Урала в стратотипическом разрезе (р. Юрюзань, г. Усть-Катав). *Литосфера*, 25(4), 748–771. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-748-771>. EDN: STFXYY

For citation: Dub S.A., Badida L.V., Melnichuk O.Yu., Leonova L.V. (2025) Diagenesis of siliciclastic and carbonate deposits of the Neoproterozoic Uk Formation in the stratotype section (Southern Urals, Yuryuzan river, Ust-Katav town). *Lithosphere (Russia)*, 25(4), 748–771. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-748-771>. EDN: STFXYY

© С.А. Дуб, Л.В. Бадида, О.Ю. Мельничук, Л.В. Леонова, 2025

the rocks were studied in thin sections under a polarizing microscope, and individual samples were examined using an electron microscope. Post-depositional transformations analysis was used to assess the nature of secondary changes. *Results.* Data on the sequence and intensity of both terrigenous and carbonate sediments alterations were obtained. All epigenetic transformations in the rocks of the Uk Formation were divided into gradational (progressive/subsidence epigenesis) and tectonic-fluid (superimposed epigenesis). Gradational transformations include progressive transformations associated with changes in thermobaric conditions over geological time, as well as authigenic native mineralogenesis. Superimposed transformations include authigenic extraneous mineralogenesis (metasomatism and filling of voids), formation of voids, and transformations associated with local changes in temperature and pressure. The superimposed processes (mainly metasomatism) were typical for deposits that initially had the highest permeability: fine-grained sandstones, oolitic limestones, intraclastic limestones and some stromatolitic limestones – they are characterized by a plethora of epigenetic products, which relationships in each case allow us to construct the sequence of processes that took place. *Conclusions.* The complex of structural and mineralogical features of rocks indicates progressive transformations at the level of the beginning of late catagenesis, which is consistent with the data literature of organic matter geochemistry, evidenced that the sediments reached the mesocatagenesis substage (“oil window”). The termination of progressive epigenesis is most likely due to the formation of the Ural orogen in the late Paleozoic. The set of secondary changes indicates a significant influence of superimposed epigenetic processes on the sedimentary sequence, but mainly only within the units or layers that could serve as fluid reservoirs (aquifers).

Keywords: *heterogeneous sedimentary sequence, petrography, post-depositional transformations analysis, epigenesis, late diagenesis, thermobaric and tectonic-fluid alterations, authigenic mineral formation, metasomatism*

Funding information

The studies were carried out in accordance with the theme of the state assignment of the IGG UB RAS (state registration No. 123011800013-6)

Acknowledgements

The authors are sincerely grateful to L.G. Vakulenko, A.N. Kolchugin and A.V. Maslov for a thorough analysis of the manuscript and a set of critical comments that contributed to the revision of a number of provisions, clarification of conclusions and improvement of formulations. Discussion of the problems addressed in the article with M.P. Pokrovsky allowed authors to take a new look at the usual ideas and better systematize the material. During the work on the text, constructive suggestions were also received from M.T. Krupenin and O.D. Nikolenko. The authors are grateful to O.L. Galakhova and T.Ya. Gulyaeva for determining the mineral composition of the rocks.

ВВЕДЕНИЕ

Рифейские отложения западного склона Южного Урала обладают хорошей сохранностью седиментогенных признаков, которые позволяют реконструировать обстановки осадконакопления и особенности бассейнов седиментации (Маслов, 1997; Крупенин, 1999; и др.). Сведения о характере постседиментационных преобразований дают возможность выделить первичные характеристики с большей точностью и, следовательно, повышают достоверность таких реконструкций. В то же время сам комплекс трансформаций является отражением геологических процессов, происходивших в осадочно-породном¹ бассейне, выстраивание хронологической последовательности которых способствует уточнению геодинамической истории рассматриваемого региона.

Рифейские отложения в разных районах и на отдельных уровнях разреза Башкирского мегантиклинория (БМА) претерпели значительные преобразования, вплоть до метаморфизма на восточном крыле БМА. Эпигенетическим изменениям в боль-

шей степени подверглись ниже- и среднерифейские толщи, тогда как отложения верхнего рифея в целом менее преобразованы (Анфимов, 1997).

Понимание природы и последовательности вторичных процессов имеет важнейшее значение и в нефтегазовой геологии (Багринцева, 1999; Вакуленко, 2017; Тугарова, 2020). Степень постседиментационных изменений терригенных и карбонатных пород обычно оценивается отдельно, с использованием разных индикаторов (например: Постседиментационные..., 1980; Холодов, 1983; Васильева, 2017; Зубков, 2017; и др.). Соответственно, по уровню преобразований осадочные толщи разного состава плохо сопоставимы друг с другом. До сих пор остается актуальным замечание Б.А. Лебедева о том, что методики оценки степени изменений терригенных и карбонатных пород не скоррелированы, а “успеха можно достичь при сравнении карбонатных пород с терригенными в одних и тех же разрезах” (1992, с. 73). В связи с этим изучение особенностей эпигенеза гетерогенной укской свиты верхнего рифея как типичного примера смешанных терригенно-карбонатных последовательностей представляется значимой задачей.

Недавно были опубликованы результаты изучения укских отложений в гипостратотипе Кулмас на

¹ По Н.Б. Вассоевичу, В.Н. Холодову, Л.В. Анфимову и др.

р. Басу (Сергеева и др., 2023). Однако для пород стратотипического разреза на р. Юрюзань данные о постседиментационных изменениях до последнего времени носили фрагментарный характер и касались только карбонатных отложений (Крылов, 1967, с. 43; Кузнецов и др., 2006, с. 31).

РАСПОЛОЖЕНИЕ И СТРАТИФИКАЦИЯ РАЗРЕЗА

Укская свита венчает каратаускую серию верхнего рифея БМА (рис. 1). Лучше всего свита представлена в считающемся стратотипическом разрезе Медведь к востоку от г. Усть-Катав (д. Шубино) Челябинской области (Беккер, 1961; Козлов, 1982; Сергеева и др., 2023). Данный разрез находится в юго-западной части Сулеймановской антиклинали и характеризуется удовлетворительной обнаженностью большинства уровней, здесь также наблюдаются взаимоотношения свиты со смежными геологическими телами (Козлов, 1982; Маслов и др., 2019).

Свита подразделяется на две подсвиты: нижнюю карбонатно-терригенную (или терригенно-карбонатную в стратотипе) и верхнюю существенно карбонатную (Беккер, 1961; Стратотип..., 1983). Нижнеукская подсвита имеет трехчленное строение: нижняя ямаштинская толща терригенная, средняя аккостякская – карбонатная, верхняя авдырдакская – терригенно-карбонатная (Дуб и др., 2024). Верхняя известняковая подсвита в стратотипе состоит из юрюзанской, медвежьей I, манайсинской и медвежьей II толщ (Дуб, Гражданкин, 2021). Мощность нижней подсвиты в этом разрезе порядка 70 м, верхней – до 145 м.

Ямаштинская толща представлена песчаниками, реже алевролитами и аргиллитами. Песчаники аркозовые и полевошпато-кварцевые, с глауконитом, преимущественно тонкозернистые (с постепенными переходами в алевролиты) до мелкозернистых, с глинистым, регенерационным кварцевым и карбонатным цементом. В составе толщи обнаруживаются редкие прослои гравелитов и конгломератов с обломками карбонатных пород. *Аккостякская* толща сложена известняками с терригенной примесью. Для нее характерны строматолиты, присутствуют также линзы карбонатных конгломератов. *Авдырдакская* толща представлена ритмичным чередованием пачек терригенных (преимущественно алевролитов) и карбонатных пород – известняков яснозернистых интракластовых и оолитовых, а также микрозернистых разностей, в том числе с текстурами molar-tooth (МТ) (Дуб и др., 2024).

Нижняя граница верхней подсвиты и одновременно *юрюзанской* толщи устанавливается по появлению в разрезе массивных известняков с тонкостолбчатыми (диаметром до 2 см) строматолитами. Породы неравномерно доломитизированы. Наибо-

лее мощная в этом разрезе толща *медвежьей I* сложена массивными постройками, отделенными друг от друга пакетами слоистых отложений или прослоями глинисто-карбонатных пород. Органогенные постройки состоят из сочлененных друг с другом биогермов толстостолбчатых (диаметром более 2 см) строматолитов, от нескольких десятков сантиметров до первых метров по высоте и ширине. Внутри построек между биогермами залегают линзы микрозернистых известняков, иногда с примесью глинистого материала. В толще отмечается слабая неравномерная доломитизация (ей наименее подвержены микрозернистые межбиогермные отложения). *Манайсинская* толща характеризуется слоистым строением и представлена ясно- и микрозернистыми известняками (в том числе чередующимися друг с другом), некоторые разности доломитизированы или слабо окремнены. Для нее характерны многочисленные МТ-текстуры. Верхняя пачка этой толщи полностью доломитизирована. В толще *медвежьей II*, которая по текстурным характеристикам близка толще медвежьей I, также присутствуют строматолитовые биогермы, значительно реже встречаются слоистые зернистые известняки, не образующие здесь отчетливо выраженных пакетов и пластов. На отдельных участках породы перекристаллизованы, доломитизированы и слабо окремнены (Дуб, Гражданкин, 2021).

Толща медвежьей II в этом разрезе срезается поверхностью несогласия, на которой залегает бакеевская свита (см. рис. 1). Глауконит в составе последней имеет возраст порядка 642 млн лет (Зайцева и др., 2019), тогда как по глаукониту укской свиты ранее были получены датировки 663 ± 9 млн лет (Rb-Sr метод) и 669 ± 16 млн лет (K-Ar метод) (Зайцева и др., 2008). Согласно последним данным, возраст укской свиты составляет более 717 млн лет (Маслов и др., 2019; Дуб, 2021; Сергеева и др., 2023).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Изучение продуктов преобразований пород укской свиты проводилось в ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург). Основной объем работ заключался в полевых наблюдениях и последующих исследованиях порядка 250 шлифов под оптическим поляризационным микроскопом. Они представлены прежде всего образцами карбонатных пород, тогда как образцов терригенных пород из них около двух десятков. Для контроля результатов петрографических исследований и уточнения соотношения минеральных компонентов в 42 образцах проведен рентгеноструктурный анализ (РСА) с применением дифрактометра Shimadzu XRD-7000, полуколичественная оценка концентраций кристаллических фаз и определение параметров элементарной ячейки выполнены с использованием программы SiroQuant (Рянская и др., 2015) (аналитики О.Л. Галахова и

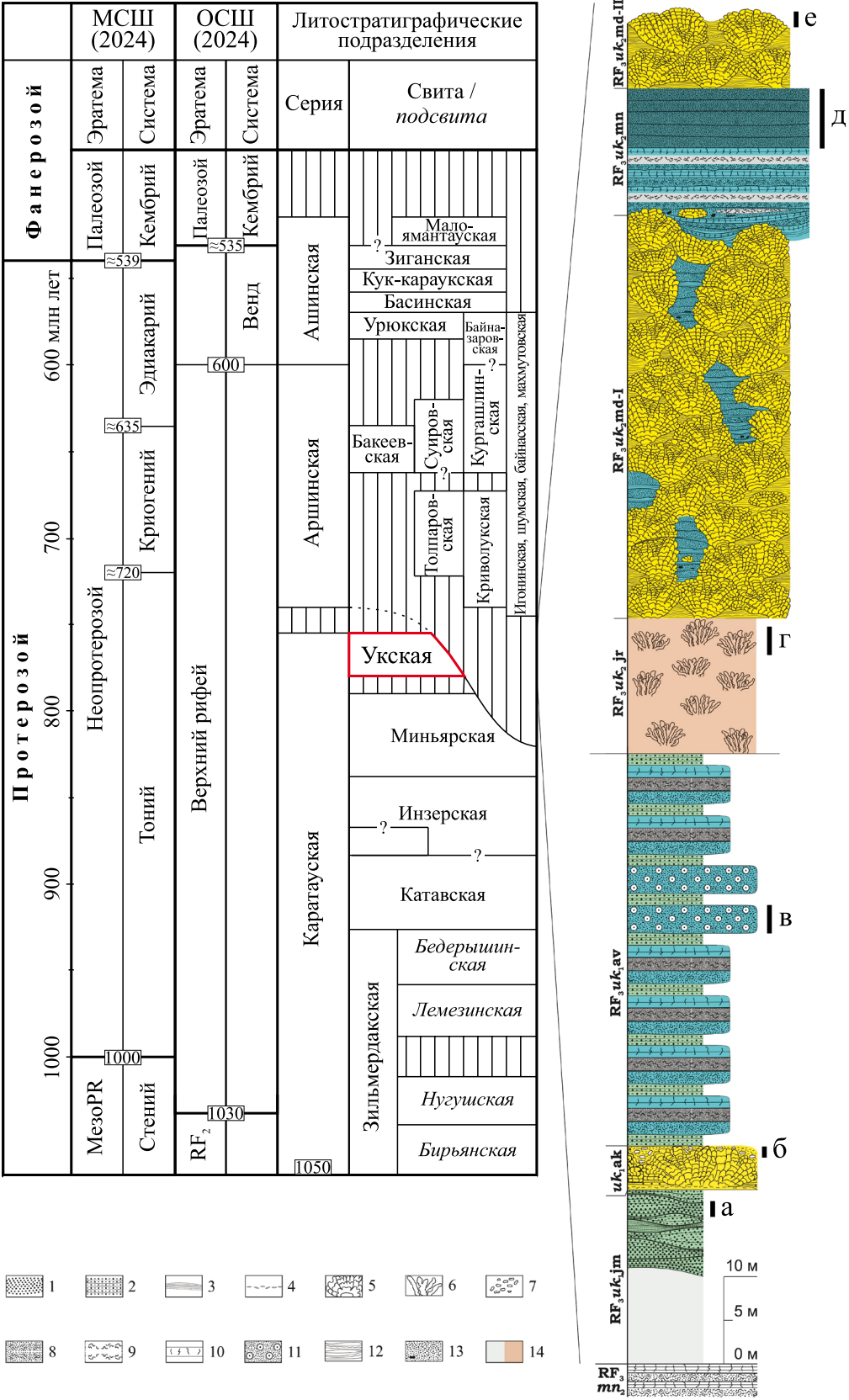


Рис. 1. Стратиграфическая схема верхнерифейско-вендских отложений БМА (модифицировано из (Дуб, 2021; см. также ссылки в этой работе)) и литолого-стратиграфическая колонка укской свиты в стратотипическом разрезе Медведь.

Циклиты, строматолиты и структурные компоненты показаны вне масштаба. Легенда к колонке: 1–3 – терригенные породы: 1 – песчаники, 2 – алевриты (в том числе с карбонатным цементом), 3 – алевриты глинистые и аргиллиты; 4–13 – известняки: 4 – с плоскими карбонатными литокластами (основание аккостякской толщи), 5 – преимущественно с толстостолбчатыми строматолитами, 6 – преимущественно с тонкостолбчатыми строматолитами, 7 – с обломками галечной размерности, 8 – интракластовые с обломками МТ-карбоната (МТ-кластами), 9 – интракластовые с МТ-прожилками по наслению, 10 – микрозернистые с субвертикальными МТ-прожилками, 11 – интракластово-оолитовые, 12 – микрозернистые тонкослоистые, 13 – интракластовые в слоистых пакетах; 14 – задернованные или плохо обнаженные интервалы. Справа от колонки показаны интервалы пород, испытавших наиболее интенсивные преобразования: а – мелко-тонкозернистые песчаники ямаштинской толщи (обр. 22.10-6-10), б – карбонатные гравелито-конгломераты аккостякской толщи, в – оолитовые известняки авдырдаской толщи (обр. 22.10-8-10), г – известняки с тонкостолбчатыми строматолитами юрюзанской толщи, д – интракластовые карбонаты верхней пачки манайсинской толщи, е – строматолитовые известняки медвежьей II толщи вблизи кровли свиты.

Fig. 1. Neoproterozoic (Upper Riphean and Vendian) stratigraphic scheme of the BMA (modified after (Dub et al., 2021), see also references in this work) and stratigraphic column for the Uk Formation in the stratotype section Medved.

Bed sets, stromatolites and texture components are out of scale. Column key: 1 – sandstones, 2 – siltstones, 3 – clayey siltstones and claystones; 4–13 – limestones: 4 – with flat carbonate clasts (Akkostyak Member base), 5 – mainly with thick-columnar stromatolites, 6 – mainly with thin-columnar stromatolites, 7 – with pebble-sized clasts, 8 – intraclastic with MT-carbonate clasts (MT-clasts), 9 – intraclastic with layer-oriented MT-veins, 10 – microgranular with subvertical MT-veins, 11 – intraclast-oolitic, 12 – microgranular, thin-layered, 13 – intraclastic in the layered bedsets; 14 – closed intervals. The intervals of rocks that have undergone the most intense transformations are shown to the right of the column: a – fine-grained sandstones of the Yamashta Member (sample 22.10-6-10), б – carbonate gravel-conglomerates of the Akkostyak Member, в – oolitic limestones of the Avdyrdak Member (sample 22.10-8-10), г – limestones with thin-columnar stromatolites of the Juryuzan Member, д – intraclastic carbonates of the upper unit of the Manaysu Member, е – stromatolitic limestones of the Medved II Member near the Uk Formation top.

Т.Я. Гуляева). Изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энерго-дисперсионные спектры (ЭДС) и карты по элементам были получены с помощью микроскопа TESCAN MIRA LMS (S6123), оснащенного спектрометром INCA Energy 450 X-MaxEDS и программным обеспечением AZtecOne (аналитик Л.В. Леонова); образцы (2 шт.) изучались на относительно ровных свежих сколах с углеродным напылением.

На плохо обнаженных интервалах разреза образцы были отобраны из расчисток. При исследованиях учитывался фактор изменения пород в современных поверхностных условиях (в первую очередь в отношении наименее устойчивых к гипергенезу минералов).

При изложении материала использованы следующие классификации: осадочных пород в целом – В.Т. Фролова (1992), песчаников – В.Д. Шутова (1967), карбонатных пород – В.Г. Кузнецова (2007) и Р. Данхэма (Dunham, 1962).

ТЕРМИНОЛОГИЯ

Под эпигенезом мы понимаем как совокупность процессов, происходящих с осадочной породой (рыхлой или литифицированной) в пределах стратисферы, так и соответствующую стадию (отрезок времени), в течение которой данные процессы протекают. Эпигенез следует за седиментогенезом и может смениться гипергенезом, составляя наравне с ними цикл литогенеза. Начало стадии связывается с пространственной изоляцией отложений от среды седиментации: она отсчитывается от момента, когда осадочные образования перестают быть частью гидросферы, атмосферы или биосферы (при

этом, разумеется, определенная связь с ними может сохраняться), переходя в состав осадочной оболочки Земли. Эпигенез – стадия бытия породы в земной коре (согласно Л.В. Пустовалову (1940)) до наступления метаморфизма с одной стороны или разрушения при взаимодействии с внешними геосферами с другой.

Рядом исследователей термин “эпигенез” не рекомендован к применению (Страхов, Логвиненко, 1959; Холодов, 1970; Вассоевич, 1983; и др.). Еще ранее было предложено (Пустовалов, 1940; Копелиович, 1965; и др.) отсчитывать наступление эпигенеза с литификации осадка (“превращения осадка в породу”). Такой подход нам представляется неудачным: часть осадочных образований (например, органогенные постройки) может быть литифицирована сразу при возникновении, тогда как другие породы (например, вулканические пеплы, голубые кембрийские “глины” и т. д.) остаются нелитифицированными, несмотря на погружение на большие глубины и длительное нахождение в земной коре.

В настоящей работе в понятие эпигенеза включаются как процессы позднего и частично раннего диагенеза (поскольку начало диагенеза обычно связывается с моментом отложения осадка), катагенеза и метагенеза (с разграничением по критерию, отражающему изменения *P-T* условий с глубиной), составляющие в совокупности “эпигенез погружения/прогрессивный”, так и процессы “наложенного эпигенеза” (по Б.А. Лебедеву (1992)), вызванные тектоническими дислокациями и инверсией/воздыманием толщ или обусловленные воздействием флюидов (любой газовой-жидкой фазы независимо от генезиса, состава и температуры). Соот-

ветственно, градационность преобразований считается только одним из проявлений эпигенеза. Противоположная “грань” – это “регрессивный эпигенез” (Рухин, 1961; Юдович, 2008). Термин “эпигенез” как нельзя лучше подходит для описания влияния процессов тектонического цикла (традиционно включающего рифтогенез, спрединг, субдукцию и орогенез) на стратисферу, так как повышение температуры и давления на границах литосферных плит может происходить неградационно, а облик и характер преобразований осадочных пород в значительной мере определяется тектоническими дислокациями и магматизмом.

При обсуждении комплекса вторичных изменений пород укской свиты видится необходимым разделение эпигенетических преобразований на градационные и наложенные. В общем случае первые представляют собой фоновые преобразования, связанные с изменением термобарических условий при погружении в течение определенного геологического времени. К ним добавляются также аутигенные собственные преобразования (Япаскурт, 2016). Вторая группа (наложенные/флюидотектонические процессы) обусловлена геодинамическими/тектоническими и гидрогеологическими (гидрохимическими или гидротермальными) факторами (Махнач, 2000; Лукин и др., 2009; Зубков, 2017; и др.). К ней относится аутигенный чужеродный минералогенез, включающий в качестве частного случая метасоматоз (свойственный всем стадиям осадочного породообразования – от диагенеза до метабенеза (Япаскурт, 2008)). К наложенным преобразованиям отнесено и формирование пустотного пространства, объясняемое тектонической активизацией.

Четкое разграничение фоновых и наложенных преобразований для того или иного объекта имеет важнейшее значение для хемотратиграфических исследований – от понимания, была ли изотопная система закрытой (когда фиксируются только фоновые изменения) или открытой (проявляются наложенные преобразования), зависит правильность построений и корреляций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минеральный состав отложений

Из нижней подсвиты отобраны 22 образца, 15 из которых представлены терригенными породами. Среди них диагностированы песчаники алевритистые и алевритовые, алевролиты песчаные и песчанистые, иногда известковистые и известковые, а также алевролиты глинистые, в полевых условиях практически неотличимые от аргиллитов. Остальные образцы представлены известняками (5 обр.) и карбонатно-кремнистыми породами (пластовыми кремневыми конкрециями? – 2 обр.).

Среди образцов пород верхней подсвиты доминируют известняки (15 обр.), встречаются доломиты (4 обр.) и карбонатно-терригенные отложения (1 обр.). Большинство известняков представлено чистыми разностями, тем не менее породы разных толщ (и разных фаций) обладают некоторыми особенностями (табл. 1). Ранее были опубликованы (Дуб, Горбунова, 2019) полные данные о химическом составе известняков (57 обр.) медвежьей I и манайсинской толщ. Объем настоящей статьи не позволяет снова подробно рассмотреть их литохимию, поэтому мы ограничиваемся лишь общими сведениями о минеральном составе, установленном по данным РСА, СЭМ и результатам изучения шлифов.

По данным РСА в составе тонкозернистых песчаников ямаштинской толщи (3 обр.) доля кварца составляет 56–67%, калиевых полевых шпатов (КППШ) – 21–26%, плагиоклазов – 7–14%; содержание кальцита достигает 12%, присутствует глинистое вещество, в обр. 22.10-6-10 также обнаруживаются доломит и сидерит (доли процента). Песчаные и песчанистые алевролиты (5 обр.) сложены кварцем (39–60%), КППШ (26–35%), плагиоклазом (12–14%) с подчиненным количеством глинистого вещества, которое не учитывалось при анализе; иногда для них характерен карбонатный цемент (максимально 21% кальцита); в обр. 22.10-6-8 отмечаются следовые количества слюды и сидерита. В глинистых алевролитах этой толщи (4 обр.) суммарное содержание обломков кварца и полевого шпата (ППШ) составляет 59–81%, соответственно доля глинистого вещества (преимущественно иллит или смешанослойные образования на его основе) в ассоциации с некоторым количеством слюды варьирует от 18 до 37%, кальцита – от 1 до 7%.

В строматолитовых и микрозернистых известняках аккостяжской толщи (3 обр.) присутствует до 12% терригенного материала (в основном силикокластика). Терригенные породы в составе авдырдаской толщи представлены известковистыми и известковыми алевролитами (3 обр.), содержащими 41–47% кварца, 20–36% ПППШ, 1–3% слюды при 18–34% кальцита. В известняках этой толщи (2 обр.) количество некарбонатной примеси составляет менее 4% (при достаточно низком содержании доломита).

Тонкостолбчатые строматолиты юрюзанской толщи (4 обр.) неравномерно доломитизированы (в обр. 1701-32 до 28% доломита) и обогащены терригенным материалом: песчано-алевритовых зерен кварца, ПППШ и слюды суммарно до 8%, глинистого вещества – до 5%.

В двух образцах толстостолбчатых строматолитов толщи медвежьей I доля силикокластики ниже 4%. В шлифах наблюдаются неравномерно распределенные скопления кристаллов доломита – как в отдельных строматолитовых слоях, так и в

Таблица 1. Минеральный состав пород уксской свиты по данным рентгеноструктурного анализа, мас. %
Table 1. Mineral composition of the Uk Formation deposits by X-ray diffraction data, wt %

Подсвита	Толща	№ образца	Литотип	Cal	Dol	Qz	Pl	Kfs	Il	Mca	Sd (?)
Верхнеукская	Мед- вежья II	22.4-10	Известняк с толстостолбчатыми строматолитами	≈99		≈1					
		22.4-9		≈99		≈1					
		22.4-6		≈99		≈1					
		22.4-5		≈97	≈2	≈1					
	Манайсинская	22.4-4	Доломит метасоматический (по интракlastовому известняку) из верхней пачки	≈2	≈98		Сл.				
		22.4-3		≈7	≈92		≈1				
		22.4-1a		≈1	≈98		≈1				
		22.4-1		≈1	≈99	Доли процента					
		1701-31		>99							
		1701-29		>99							
		1701-26		≈25		≈45	Доли процента		≈30		
Нижнеукская	Медвежья I	1701-40	Известняк яснозернистый интракlastовый (из слоистых пакетов) Известняк с толстостолбчатыми строматолитами Известняк яснозернистый интракlastовый (из слоистых пакетов) Известняк микрозернистый тонкослоистый (межбиогермный) Известняк с толстостолбчатыми строматолитами	≈99		<1					
		1701-38		96–97		3–4					
		1701-14		≈98		<2					
		1701-19		≈98		≈2					
	Юрюзанская	1701-18		≈98		<2					
		1701-20		≈89		≈2	<3		≈3	≈2	
		1701-32		≈60	≈28	≈7	Доли процента		≈5		
		1701-001a		97		2	1				
	Авдырдакская	1701-001	Алевролит известковый Кремневая конкреция по оолитовому известняку Алевролит известковый Кремневая конкреция по оолитовому известняку Алевролит известковый Известняк микрозернистый с МТ-текстурами (верхний элемент цикла) Известняк яснозернистый интракlastовый с МТ-текстурами (нижний элемент цикла)	93		4	3				
		22.10-8-14*		18	Сл.	45	15	21	Сл.	1	
		22.10-8-10*		40		60			Сл.		
		22.10-8-8*		34	Сл.	43	7	13	Сл.	3	
		22.10-8-7		41		59					
		22.10-8-5*		25		47	9	17	Сл.	2	
		22.10-8-4		98		2					
		22.10-8-2		90	6 (Fe-Dol)	4	Сл.				

Таблица 1. Окончание
Table 1. Ending

Подвита	Толща	№ образца	Литотип	Cal	Dol	Qz	Pl	Kfs	Il	Mca	Sd (?)
Нижнеукская	Аксотская	22.10-6-18	Известняк микрозернистый глинисто-алевритистый	81	7 (Fe-Dol)	8	1		3		
		22.10-6-17	Известняк строматолитовый	95		4	1				
		22.10-6-16		97		3					
	22.10-6-13	Алевролит сильноглинистый	4		25	11	23	37	Доли процен-та Сл. Сл.		
	22.10-6-12*	Алевролит песчанистый известковистый	21		39	14	26	Сл.			
	22.10-6-11	Алевролит слабоглинистый	7		28	12	29	24			
	22.10-6-10	Песчаник тонкозернистый алевритистый известковистый	12	Доли процента	59	7	22				
	22.10-6-9*		Алевролит песчаный	9		52	12	27		Сл.	
	22.10-6-8		Алевролит песчанистый	1		51	14	34		Сл.	
	22.10-6-7		Алевролит сильноглинистый	1		29	11	28		31	
	22.10-6-5		Алевролит песчанистый	Сл.		52	13	35		Сл.	
	22.10-6-4	Алевролит слабоглинистый	1		35	15	31	18			
	22.10-6-3*	Песчаник тонкозернистый алевритовый	4		56	14	26	Сл.			
22.10-6-2*	Сл.			60	13	27	Сл.				
22.10-6-1*	Песчаник тонкозернистый алевритовый	Сл.		67	11	21	Сл.				

*Образец содержит реликты глинистого вещества (иллит, хлорит, смешанослойные образования, точнее не определимые), которые не учитывались в общем балансе.
Примечание. Аббревиатуры минералов: Cal – кальцит, Dol – доломит, Sd – сидерит, Qz – кварц, Fsp – полевошпат (в том числе Kfs – калиевый полевошпат, Pl – плагиоклаз), Mca – слюда (хлоритизированный биотит, мусковит), Il – иллит или смешанослойное образование на его основе. MT-текстуры – текстуры molar-tooth.

*Sample with clay minerals (illite, chlorite, mixed-layer clay minerals, not definable more precisely), which were not taken into account in the overall balance.
Note. Mineral abbreviations: Cal – calcite, Dol – dolomite, Sd – siderite, Qz – quartz, Fsp – feldspar (including Kfs – potassium feldspar, Pl – plagioclase), Mca – mica (chloritized biotite, muscovite), Il – illite or mixed-layer clay minerals. MT – molar-tooth structures.

межстолбиковом пространстве. Межбиогермные отложения в толще медвежьей I (данные РСА по одному образцу в сочетании с информацией по многочисленным шлифам) нередко обогащены глинистым веществом, которое, как правило, концентрируется в отдельных слоях. В отложениях этого типа встречаются как чистые, так и сильно-глинистые известняки. В двух образцах зернистых известняков слоистых пакетов доля некарбонатного компонента до 2%.

Вблизи границы медвежьей I и манайсинской толщ отобран образец карбонатно-терригенной породы, состоящей на ~45% из кварца, ~30% иллита и ~25% кальцита. Опробованные известняки манайсинской толщи характеризуются высокой чистотой (более 99% кальцита), при этом помимо рассеянной терригенной примеси на отдельных уровнях в них встречаются мелкие пятна окремнения. Доломиты верхней пачки манайсинской свиты (4 обр.) состоят на 92–99% из минерала доломита, при этом доля силикокластики в них низкая (до 1%).

Строматолитовые известняки медвежьей II толщи (4 обр.) содержат еще меньше некарбонатной примеси, нежели строматолиты медвежьей I толщи, – доля кварца в среднем около 1%, при этом он не находится в составе силикокластики, а связан с окремнением (см. далее). В этих известняках также проявлена неравномерная доломитизация.

Признаки преобразований терригенных пород

Петрографические исследования показывают, что зерна кварца в песчаниках и алевролитах (в меньшей степени) ямаштинской толщи часто регенерированы. Аутигенный/регенерационный кварц в первую очередь приурочен к породам, содержащим минимальное количество глинистого вещества. Первичные контуры зерен прерывистые, но распознаваемые. Регенерационные каемки кварца как полные, так и частичные. Их толщина может достигать 0.05 мм, что иногда сопоставимо с размером самих зерен (рис. 2а). Обломки ПШ, представленных КППШ и плагиоклазом, претерпели различные преобразования – от серицитизации до слабой регенерации. Обломки пород (кремни и микрокварциты) очень редки, поэтому их изменения не зафиксированы. Контакты зерен от точечных до инкорпорационных, преобладают конформные. Микростилолитовые и сутурные межзерновые контакты практически отсутствуют. Чешуйки слюд деформированы, биотит гидратирован и хлоритизирован, тогда как мусковит изменен в меньшей степени. Встречаются глобулы глауконита. Для песчаников и алевролитов характерен глинистый, карбонатный и регенерационный кварцевый цемент (здесь и далее к цементу отнесены также любые аутигенные минералы, заполняющие пустоты, – межзерновые и внутриззерновые поры, а также каверны).

В некоторых образцах присутствуют все типы цемента, но обычно преобладают один или два из них. Глинистый цемент представлен в основном иллитом, иногда слабо измененным. Нередко к нему приурочены гидроксиды железа. В единичных случаях роль цемента играет пирит (рис. 2б).

Карбонатный цемент поровый до базального, нередко коррозионный, в основном кальцитовый (рис. 2в). Он приурочен к песчаникам, граничащим с пачками известняков. Минералы, замещающие обломочные зерна и глинистый цемент, представлены также доломитом и/или сидеритом, но они играют второстепенную роль. На отдельных участках железистый карбонат (сидерит и/или анкерит) развивается в том числе по регенерированному кварцу (рис. 2г). Трещины в песчаниках главным образом послойные, толщиной до первых миллиметров, залечены яснокристаллическим кальцитом.

Привлечение СЭМ позволило детализировать некоторые особенности продуктов эпигенеза песчаников на примере обр. 22.10-6-10. Обломки плагиоклазов полуокатанные и полуугловатые, трещиноватые, неоднородные вследствие преобразований (серицитизированы и пелитизированы), тогда как соседствующие с ними зерна КППШ субидiomорфны и имеют “свежий” вид, что указывает на их регенерацию или аутигенную природу (рис. 3а). Таким образом, характер преобразований КППШ и плагиоклазов заметно различается.

Получена дополнительная информация о распределении железистого карбоната (сидерита?), который часто ассоциирует с кальцитовым цементом и выступает в качестве наиболее поздней фазы, замещая различные компоненты породы (как обломочные, так и аутигенные), в том числе глобулы глауконита (рис. 3б). Современные гипергенные процессы не позволили этой карбонатной фазе сохраниться в неизменном виде, поэтому во многих случаях к нему приурочены неравномерно распределенные гидроксиды железа (в виде частичных псевдоморфоз), вследствие чего в отдельных точках элементный состав этих образований (Fe и O) различен и отличается от стехиометрического для сидерита (определенную роль в этом играет и неровная поверхность скола). При этом в ЭДС-спектрах практически не обнаруживается магний.

О степени преобразования отложений можно судить также по трансформациям биотита. В этом же образце песчаника, характеризующегося интенсивной регенерацией кварца, внутри нескольких крупных чешуек биотита встречаются участки, обогащенные титаном: отдельные многочисленные новообразования на плоскости спайности биотита, преимущественно линзовидной формы и размером до нескольких микрон, образуют неравномерно распределенные скопления (рис. 3в, г). Вероят-

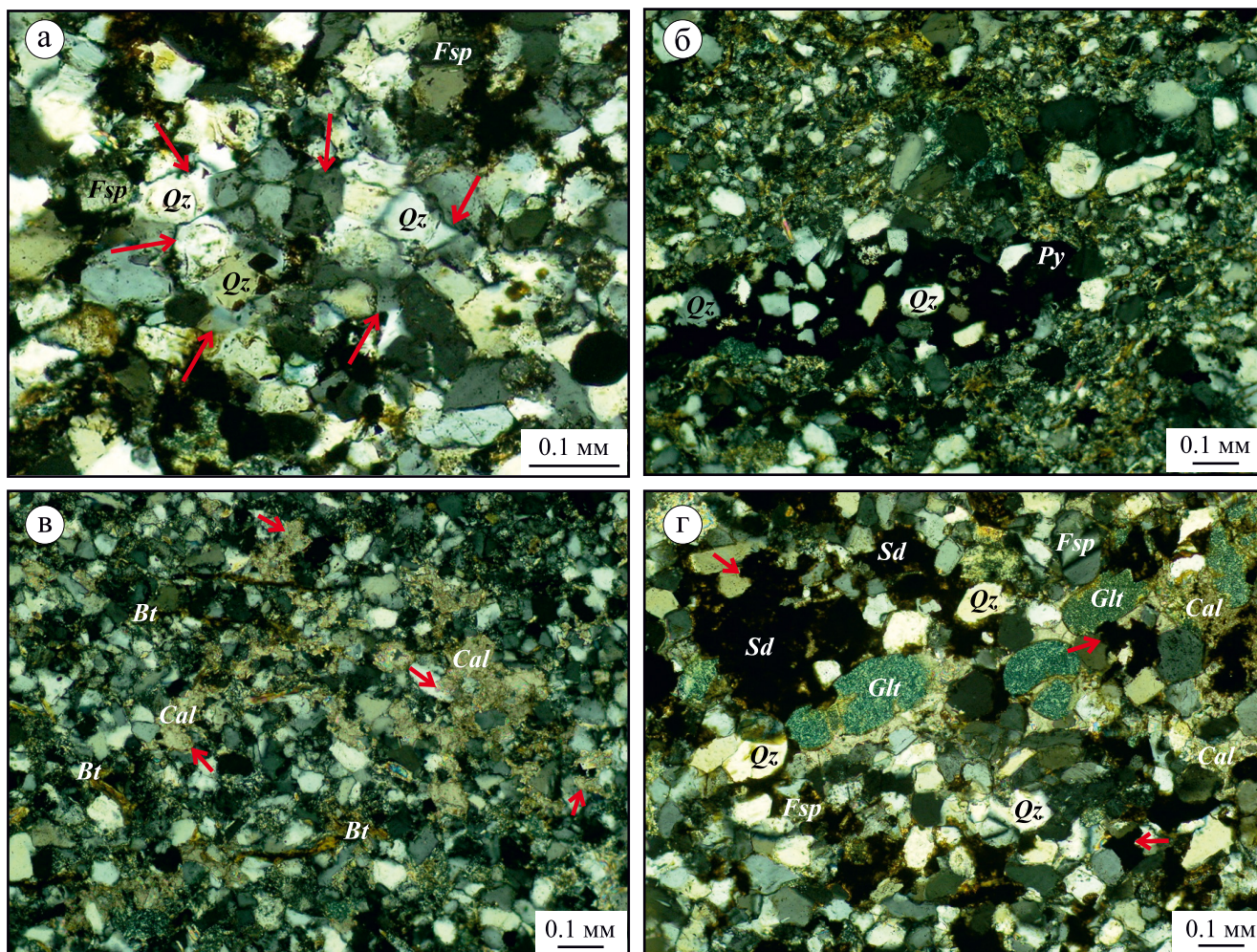


Рис. 2. Постседиментационные преобразования терригенных пород (нижнеукская подсвита, ямаштинская толща) в стратотипе (все фото в скрещенных николях).

а – тонкозернистый песчаник с многочисленными регенерированными зернами кварца, наиболее толстые регенерационные каймы показаны красными стрелками (обр. 22.10-6-1); б – скопления песчаных зерен / литокласты песчаников (?) с пиритовым и глауконитовым цементом в алевролите (обр. 22.10-6-6); в – поровый и коррозионный кальцитовый цемент, наиболее характерные участки коррозии зерен кальцитом показаны красными стрелками (обр. 22.10-6-8); г – мелко-тонкозернистый песчаник с многочисленными неоднородными по структуре глобулами глауконита, с глинистым, регенерационным кварцевым и кальцитовым цементом, с широко развитым Fe-карбонатом (сидеритом?), красными стрелками показаны участки коррозии регенерационного кварца Fe-карбонатом (сидеритом?) (обр. 22.10-6-10). Условные обозначения к этому и последующим рисункам: Qz – кварц, Fsp – полевой шпат (Kfs – КПШ, Pl – плагиоклаз), Bt – биотит, Glt – глауконит, Cal – кальцит, Dol – доломит, Sd – сидерит, TiA – аутигенные Ti-содержащие фазы.

Fig. 2. Diagenetic alterations of sedimentary rocks (Lower Uk Subformation, Yamashta Member) in the stratotype (all micrographs with polarizers on).

а – very fine sandstone with many regenerated quartz grains, thickest coats are marked with red arrows (sample 22.10-6-1); б – quartz grains aggregations / sandstones fragments (?) with pyrite/glaucinite cement in siltstone (sample 22.10-6-6); в – pore and corrosion calcite cement, mostly typical corrosion sites are marked with red arrows (sample 22.10-6-8); г – fine-very fine sandstone with numerous inhomogeneous glauconite globules, with clay, authigenic quartz and calcite cement, and with abundant Fe-carbonate mineral (siderite?), which partially replace the authigenic quartz (marked with red arrows) (sample 22.10-6-10). Legend to this and other figures: Qz – quartz, Fsp – feldspar (Kfs – potassium feldspar, Pl – plagioclase), Bt – biotite, Glt – glauconite, Cal – calcite, Dol – dolomite, Sd – siderite, TiA – authigenic Ti-bearing phases.

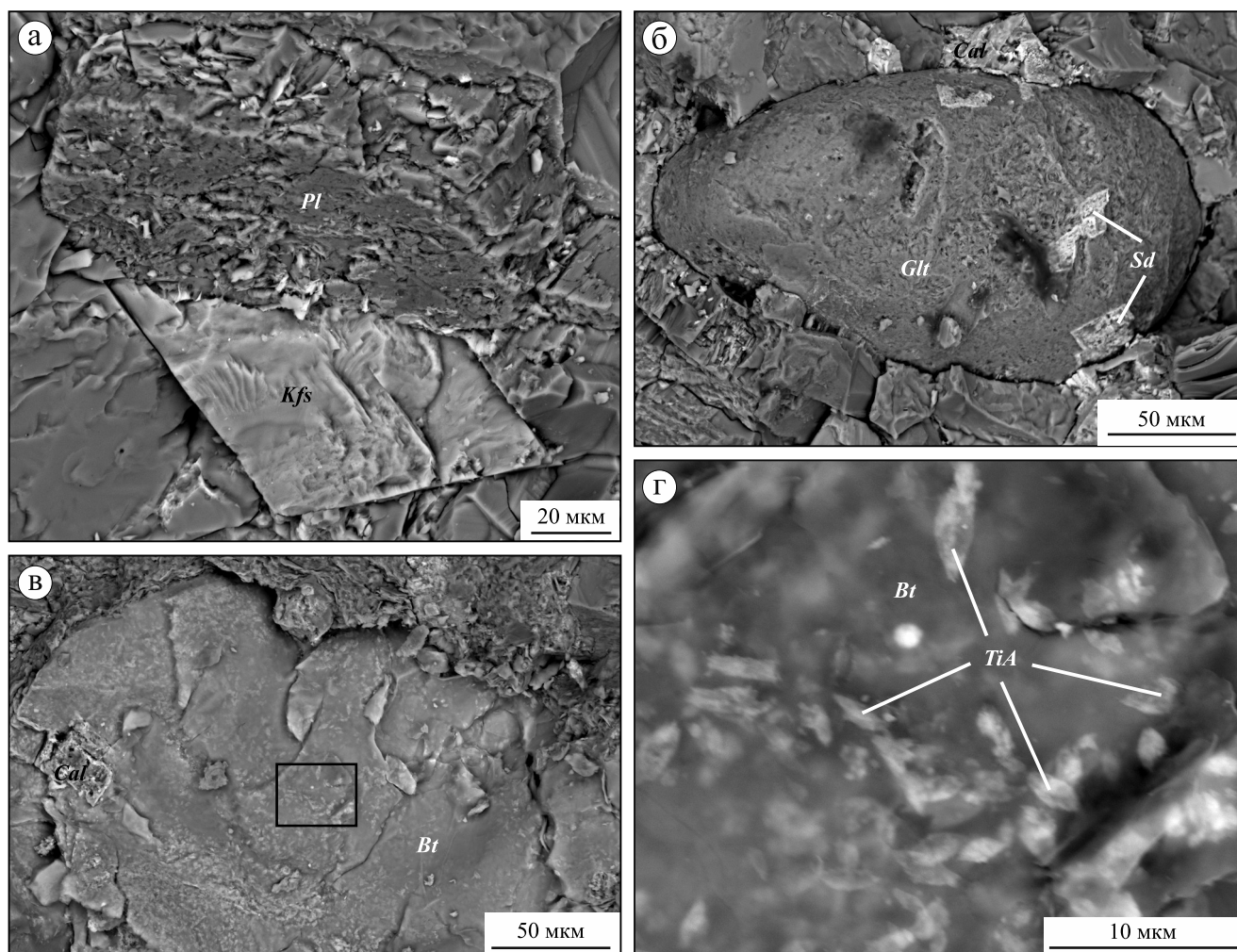


Рис. 3. Постседиментационные преобразования отдельных компонентов терригенных пород ямаштинской толщи в стратотипе (СЭМ, все фото – обр. 22.10-6-10 в режиме 4Q-BSE COMPO).

а – обломок плагиоклаза и регенерированный индивид КПШ; б – глобулярный глауконит, корродированный Fe-карбонатом (сидеритом?); в – поверхность преобразованной чешуйки биотита (черный прямоугольник – изображение г); г – чешуйка биотита с многочисленными аутигенными фазами титана.

Fig. 3. Diagenetic alterations of distinct sedimentary rocks components in the Yamashta Member, stratotype area (SEM, all micrographs – sample 22.10-6-10 in 4Q-BSE COMPO regime).

а – plagioclase grain and regenerated potassium feldspar; б – globular glauconite, corroded with Fe-carbonate mineral (siderite?); в – surface of the altered biotite flake (black box – part г of this fig.); г – biotite flake with abundant authigenic Ti-phases.

но, они могут считаться уже самостоятельными Ti-содержащими минеральными фазами.

Признаки преобразований карбонатных пород

Формирование раннедиагенетических (практически сингенетичных осадконакоплению) МТ-текстур (Петров, 2011; Kriscautzky et al., 2022) не относится авторами к эпигенетическим процессам.

Относительно ранние эпигенетические преобразования известняков включают в себя формирование аутигенного глауконита в известняках нижней

подсветы (рис. 4а) и слабое окремнение (приуроченное к МТ-карбонату) пород манайсинской толщи (рис. 4б). Глауконит в известняках находится не в межзерновых порах, а в микрокавернах. В некоторых микрозернистых разностях известняков проявлены слабая перекристаллизация основной массы и тонкие мелкозубчатые стилолиты и парастилолиты по наслоению (рис. 4в). Из признаков более поздних преобразований следует отметить пятнистую перекристаллизацию (рис. 4г), пятнистое окремнение (рис. 4д, е), а также разноориентированные стилолитовые швы (рис. 5а, б) и кальцитовые прожилки (рис. 5в).

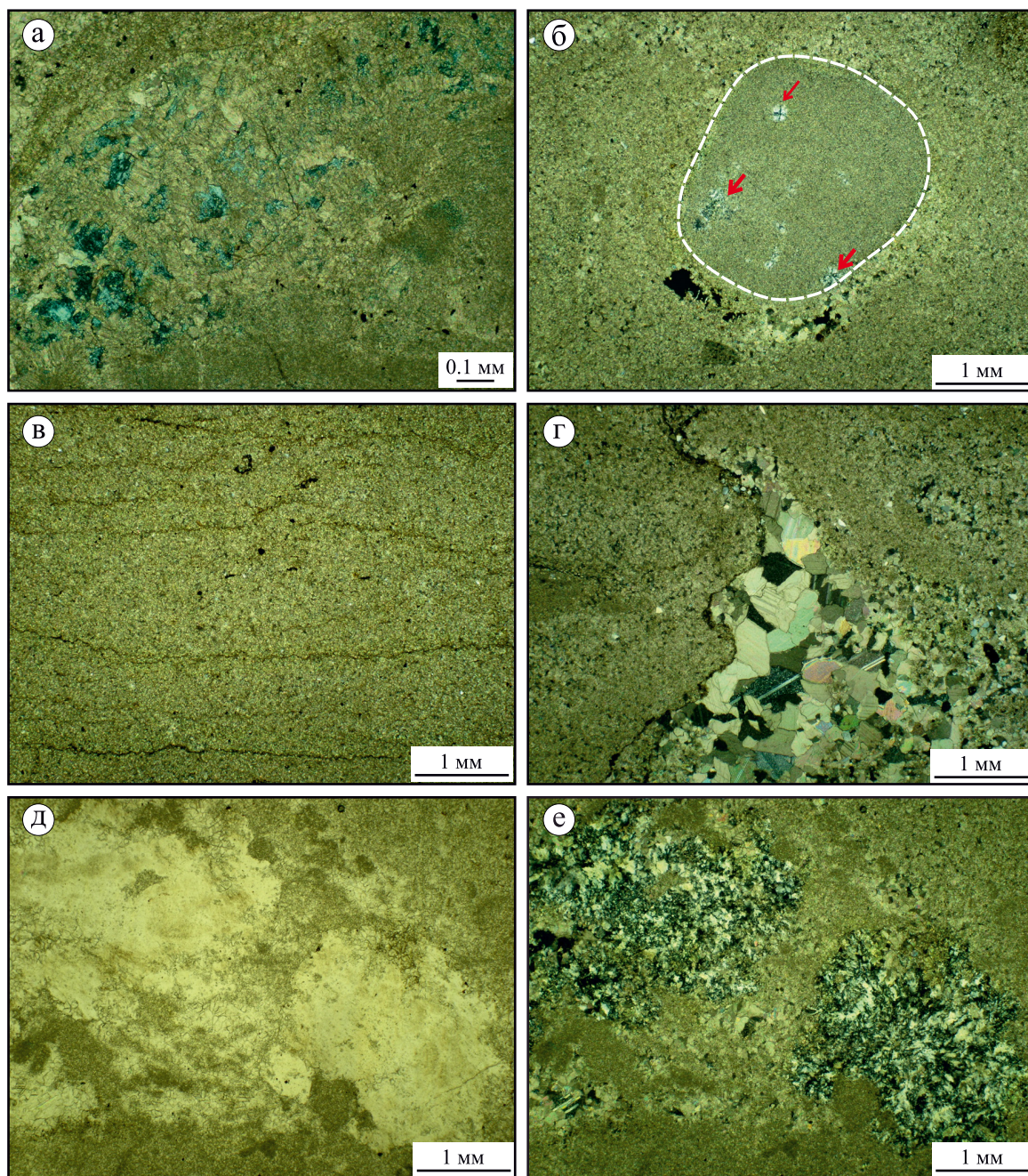


Рис. 4. Постседиментационные преобразования карбонатных пород укской свиты в стратотипе.

а–г, е – николи скрещены, д – параллельны. а – глауконитовый цемент в пустотах (обр. 22.10-8-11, авдырдакская толща); б – локальное окремнение (отмечено красными стрелками) в интракласте микропаритовой массы (МТ-карбонат), контур обломка выделен штриховой линией (обр. 22.10-6-16, аккостякская толща); в – слабо перекристаллизованная основная масса микрозернистого известняка (мадстоуна) с тонкими послойными стилолитами (обр. 22.10-6-15, аккостякская толща); г – участок перекристаллизованной массы (пятнистая перекристаллизация), ограниченный поверхностью стилолитового шва, в известняке с примесью силикокластики (обр. 22.10-6-19, аккостякская толща); д, е – стяжения кремней в строматолитовых известняках медвежьей II толщи (обр. 22.4-5).

Fig. 4. Diagenetic alterations of carbonate rocks in the Uk Formation stratotype.

а–г, е – polarizers on, д – off. а – glauconite cement in vugs (sample 22.10-8-11, Avdyrdak Member); б – silicification sites (marked with red arrows) in microsparite intraclast (MT-carbonate), grain shape marked with dashed line (sample 22.10-6-16, Akkostyak Member); в – weakly recrystallized fine-grained limestone (calcimudstone) with thin layer-oriented stylolites (sample 22.10-6-15, Akkostyak Member); г – recrystallized mass site (spotty recrystallization), restrained with stylolite, in limestone with siliciclastic admixture (sample 22.10-6-19, Akkostyak Member); д, е – silicification nodules in stromatolitic limestones, Medved II Member (obr. 22.4-5).

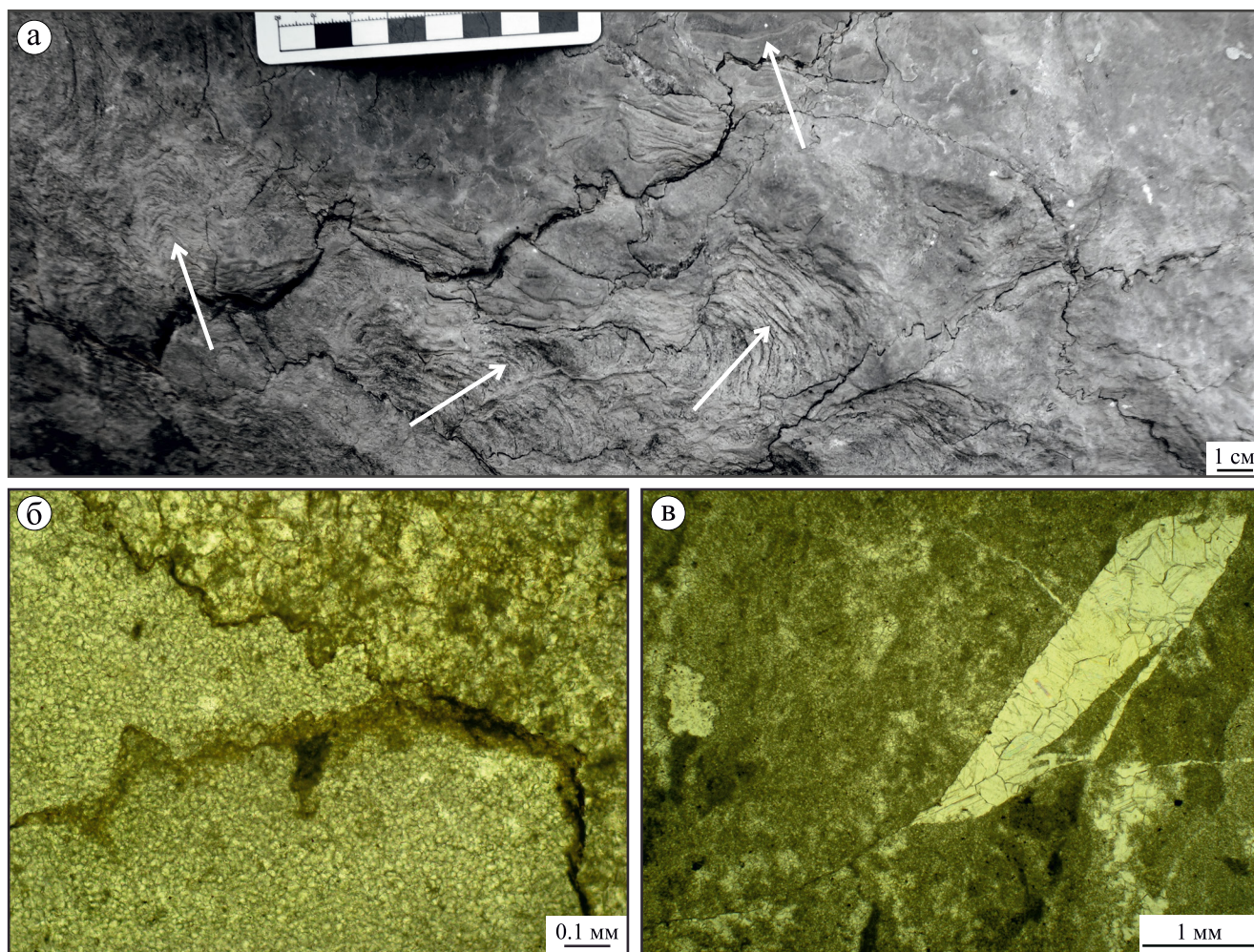


Рис. 5. Разноориентированные стилолитовые швы и кальцитовые прожилки в известняках укской свиты.

а – медвежья I толща (детали обнажения, стрелками показана ориентировка строматолитовых столбиков); б, в – медвежья II толща (обр. 22.4-7, николи параллельны).

Fig. 5. Diversely oriented stylolites and calcified veins in the Uk Formation limestones.

а – Medved I Member (section details, stromatolite columns orientation is shown by arrow); б, в – Medved II Member (sample 22.4-7, polarizers off).

Для оолитовых известняков авдырдакской толщи характерны целые окремненные пласты (рис. 6а, б). В некоторых замещенных халцедоном оолитах встречаются изометричные кристаллы пирита (и псевдоморфозы по нему) (рис. 6в). Кремневые конкреции подвергались вторичной карбонатизации – развитию по основной кремнистой массе кристаллов кальцита с зонами, обогащенными железом (рис. 6г–з), наблюдаемой в том числе в обр. 22.10-8-10.

Из метасоматических процессов наибольший масштаб имела доломитизация. Доломит, по-видимому, представлен несколькими генерациями. В верхнеукской подсвите стратотипа доломитизация проявлена как локально, так и масштабно. В первом случае это ромбоэдрический доло-

мит, занимающий только определенные участки (рис. 7а), он нередко приурочен к стилолитовым швам; во втором – проявлен в отдельных “горизонтах”. Сильнее всего доломитизированы изначально наиболее проницаемые породы – известняки с тонкостолбчатыми строматолитами (юрюзанская толща, см. табл. 1) и выдержанная по мощности пачка зернистых известняков в верхней части манайсинской толщи (рис. 7б).

В нижней подсвите также распространен железистый карбонат (сидерит и/или анкерит). В яснозернистых (оолитовых) разностях он обладает выпуклыми гранями и ярко выраженной зональностью, обусловленной неравномерным распределением железа, и напоминает седловидный доломит (saddle dolomite) (рис. 7в). Исходя из выявленной

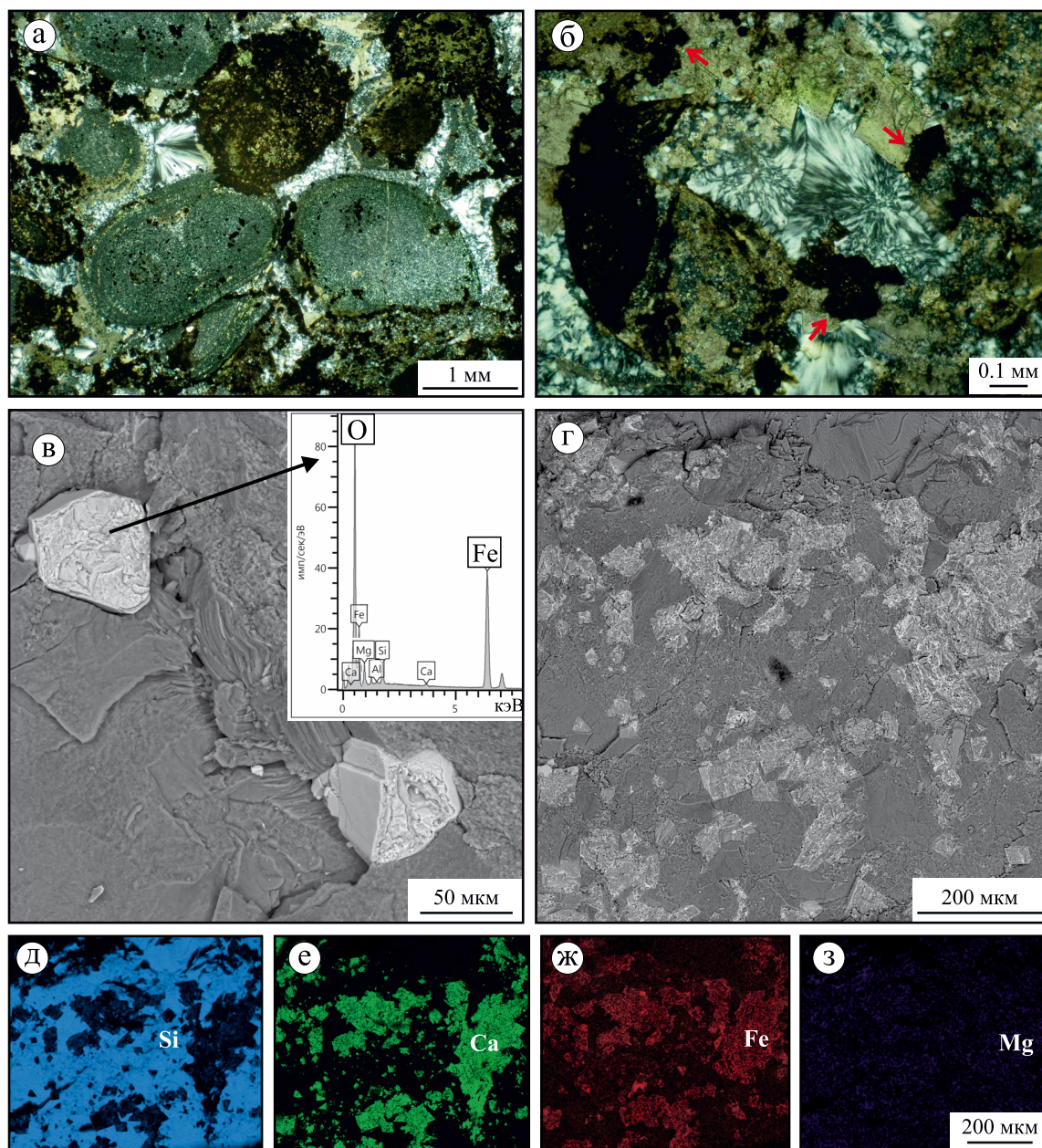


Рис. 6. Признаки преобразований кремневых конкреций, сформировавшихся по оолитовым известнякам авдырдакской толщи, в стратотипе укской свиты.

а, б – оптическая поляризационная микроскопия (никколи скрещены): а – окремненные оолиты с халцедоновым цементом в межзерновом пространстве (обр. 22.10-8-10), б – карбонатные фазы, развивающиеся по кремнистым компонентам породы (халцедоновому цементу и оолитам), красными стрелками показаны участки, на которых Fe-карбонат корродирует чуть более ранние кристаллы кальцита(?) (обр. 22.10-8-7); в–з – СЭМ (все фото – обр. 22.10-8-10): в – псевдоморфозы (гидр)оксидов железа по вкрапленным пириту, г – агрегаты эпигенетических кристаллов карбоната (кальцит с обогащенными Fe (сидерит?) зонами) в основной массе кремнезема (режим 4Q-BSE COMPO), д–з – детальные ЭДС-карты распределения отдельных элементов на рис. 6г: Si, Ca, Fe, Mg.

Fig. 6. Alterations of silicious concretions formed on oolitic limestones (Avdyrdak Member in the stratotype section of the Uk Formation).

а, б – optical microscopy (polarizers on): а – silicified oolites with silica cement in the intergranular space (sample 22.10-8-10), б – different generations of carbonates replace other components of the rock (silica cement and silica-replaced oolites), red arrows show areas where Fe-carbonate corrodes slightly earlier calcite crystals(?) (sample 22.10-8-7); в–з – SEM (all pictures of sample 22.10-8-10): в – pseudomorphoses of iron (hydr)oxides on pyrite phenocrysts, г – aggregates of epigenetic carbonate crystals (calcite with Fe-rich zones (siderite?)) in the silica main mass (mode 4Q-BSE COMPO), д–з – detailed distribution maps (EDS-maps) of individual elements Fig. 6г: Si, Ca, Fe, Mg.

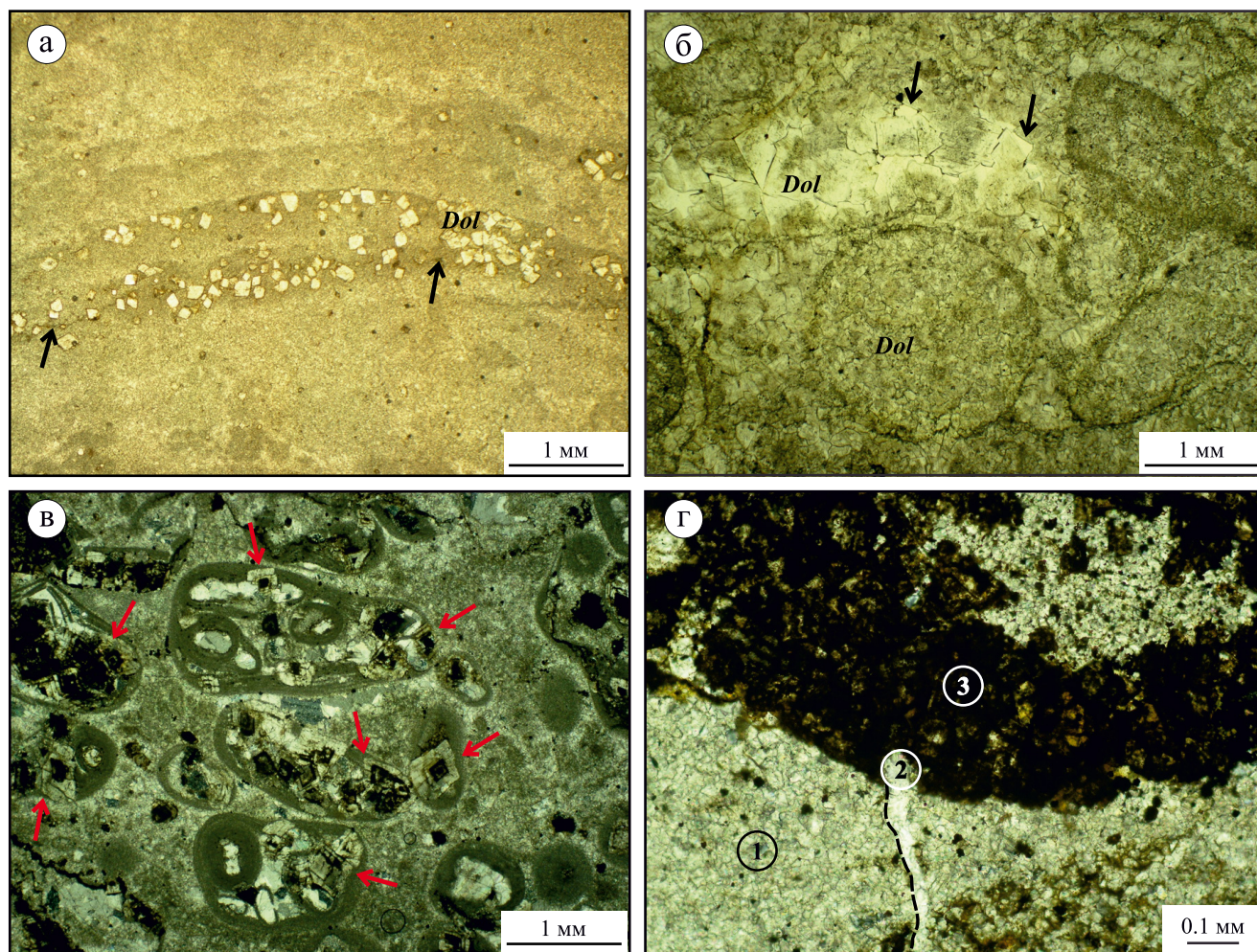


Рис. 7. Признаки постседиментационных преобразований карбонатных пород укской свиты.

Продукты доломитизации и сидеритизации (?) (а, б – николи параллельны; в, г – скрещены): а – скопления кристаллов метасоматического доломита в строматолитовых слойках, стрелками показаны очень тонкие стилолиты (обр. 1701-15, медвежья I толща); б – полностью доломитизированные интракластовые отложения, стрелками показаны микроаверны (обр. 22.4-1, верхняя пачка манайсинской толщи); в – оолитовый известняк с зональными кристаллами седловидного доломита (анкерита?), обозначенными красными стрелками (обр. 22.10-8-15, авдырдакская толща); г – агрегаты Fe-карбоната, замещающие другие компоненты породы, в том числе кальцитовые прожилки, цифрами в кружках обозначена последовательность эпигенетических процессов: 1 – перекристаллизация основной массы, 2 – образование кальцитовых прожилков, 3 – формирование Fe-карбоната (обр. 22.10-7-4, аккостякская толща).

Fig. 7. Diagenetic alterations of the Uk Formation carbonate rocks.

Dolomitization and sideritization (?) products: (a, б – polarizers on; в, г – off): а – accumulations of metasomatic dolomite crystals in stromatolitic layers, arrows show very thin stylolites (sample 1701-15, Medved I Member); б – completely dolomitized intraclast deposits, arrows show microcavities/ vugs (sample 22.4-1, upper unit of Manaysu Member); в – oolitic limestone with zonal crystals of saddle dolomite (ankerite?), which are marked by red arrows (sample 22.10-8-15, Avdyrdak Member); г – Fe-carbonate aggregates, that replace other rock components, including calcite veins. The numbers in circles indicate the sequence of epigenetic processes: 1 – matrix recrystallization, 2 – calcite veins formation, 3 – metasomatic Fe-carbonate formation (sample 22.10-7-4, Akkostyak Member).

последовательности минералообразования, можно заключить, что сильнее всего обогащены железом наиболее поздние минеральные фазы, которые корродируют как ранние кристаллы кальцита и доломита, так и все остальные компоненты пород, включая кальцитовые прожилки (рис. 7г). Кристаллы Fe-карбоната обычно размером в пределах

0.05–0.25 мм, субидiomорфные, одиночные или образующие скопления. В изученных шлифах они часто имеют бурый цвет.

Для известняков медвежьей II толщи типичны пятна окремнения (см. рис. 4д, е), а также неравномерно перекристаллизованная основная масса. Кроме того, вблизи верхней границы толщи об-

наруживаются светлые “мраморовидные” участки крупнокристаллического кальцита. Несомненно, определенную роль в общей картине преобразований сыграли гипергенные процессы: в кровле свиты фиксируются проявления палеокарста – карманы, заполненные отложениями бакеевской свиты (что обусловлено перерывом, связанным с оледенением), но не всегда результаты их воздействия легко отличимы от продуктов глубинных преобразований – для точной диагностики требуется привлечение изотопно-геохимических данных.

ОБСУЖДЕНИЕ

Характер преобразований

Система признаков, позволяющих судить о степени прогрессивных преобразований для карбонатных пород, проработана значительно менее детально, нежели для терригенных. Однако обобщающие публикации последних десятилетий несколько восполняют этот пробел (Багринцева, 1999; Гмид, 2006; Морозов, 2009; Кольчугин и др., 2019; Тугарова, 2020; Immenhauser, 2022; и др.). В настоящей работе предпринята попытка увязать картину преобразований карбонатных пород с данными об уровне градационных изменений терригенных отложений.

Решение задачи осложняется обилием продуктов наложенных процессов, особенно в толщах карбонатных пород. По результатам исследований установлено, что разным уровням разреза присуща различная интенсивность преобразований, которая может различаться даже у смежных слоев. Так, некоторые отложения, например мелко-тонкозернистые песчаники и окремненные оолитовые известняки, более преобразованы по сравнению с окружающими их породами, что, скорее всего, объясняется повышенной проницаемостью указанных образований для растворов, мигрирующих в осадочной толще. Тем не менее в отложениях разного состава можно распознать хронологическую последовательность изменений.

В соответствии со сказанным эпигенетические преобразования, проявленные в изученных отложениях, были подразделены на градационные (стадиальные) и наложенные (табл. 2). Однако не все зафиксированные трансформации могут быть строго классифицированы. Например, процессы регенерации обломочных зерен в каком-то смысле объединяют стадиальные (аутигенный собственный минералогенез) и наложенные (аутигенный наложенный минералогенез – минералогенез за счет привнесенного вещества) изменения (по О.В. Япаскурту (2016)). С одной стороны, для регенерации требуется “подпитка” растворами с кремнеземом (источник которых не всегда ясен, но, как правило, принадлежит той же толще терригенных пород), с другой – широко развитая регенерация зерен квар-

ца всегда рассматривается как индикатор достаточно глубоких стадийальных преобразований. По причине недостатка данных обозначенные преобразования отнесены к стадиальным условно.

Аутигенный карбонат в терригенных породах тоже может быть как собственным (при формировании из поровых морских вод), так и наложенным (например, если его источником служила аутигенная углекислота, возникшая в результате реминерализации органического вещества). Соответственно, образование предположительно раннего аутигенного кальцита отнесено к градационным преобразованиям, гипотетически позднего – к наложенным. Для уточнения этого вопроса в отношении конкретных минеральных фаз нужны дополнительные данные.

Градационные преобразования

Для алевроито-песчаных пород характерны механическое уплотнение, регенерация силикокластики, трансформация глинистых минералов и слюд, образование титансодержащих аутигенных фаз в чешуйках биотита. В то же время типичных проявлений метазенеза, таких как грануляция и масштабный рекристаллизационный бластез, пластические деформации и растворение зерен под действием стресса, полное разложение биотита (в соответствии с представлениями О.В. Япаскурты), не зафиксировано. Конформность межзерновых контактов, как и формирование пленочного глинистого цемента в алевролитах, скорее всего, обусловлены механическим уплотнением, а не “гравитационной коррозией” зерен.

Обращает на себя внимание более высокая доля кварца относительно ПШ в песчаниках, по сравнению с алевролитами, в ямаштинской толще (см. табл. 1). Такое распределение объясняется более интенсивным развитием регенерационного кварцевого цемента в породах, содержащих меньшее количество глинистого вещества и карбонатного цемента (т. е. в связи с большей проницаемостью песчаников). Вероятно, обилием аутигенного кварца затуманено присутствие в породах зерен ПШ, что затруднило их визуальную диагностику и аттестацию аркозового состава пород. В то же время, по-видимому, имела место и некоторая регенерация зерен КПШ. Однако вопрос об источнике калия для образования регенерационных кайм остается открытым. С одной стороны, его источником мог служить глауконит; с другой, можно предположить, что иллитизации и регенерации КПШ способствовал некий единый процесс поступления К (“калиевый метасоматоз”?). К сожалению, точно оценить долю аутигенного КПШ не представляется возможным.

Глинистые минералы терригенных пачек укской свиты в подавляющем большинстве случаев

Таблица 2. Комплекс эпигенетических преобразований терригенных и карбонатных отложений укской свиты в стратотипе
Table 2. Diagenetic transformations of siliciclastic and carbonate deposits of the Uk Formation in the stratotype section

Преобразования							
Градационные/стадиальные (эпигенез погружения / прогрессивный эпигенез)			Наложенные/флюидотектонические (наложенный эпигенез, в том числе регрессивный)				
Состав пород	Фоновые (термобарические + геологическое время)	Аутигенный собственный минералогенез (заполнение пустот)	Аутигенный чужеродный минералогенез		Образование пустот (вторичных)		Преобразования, не связанные с изменением состава пород и образованием пустот (геодинамические или определяемые локальным изменением $P-T$ условий)
			Заполнение пустот	Метасоматоз	Образование каверн	Образование трещин	
Терригенные	Уплотнение, механические деформации зерен, серицитизация ПШ, иллитизация смектита/монтмориллонита, слабая серицитизация иллита, “созревание” ОВ, хлоритизация и деградация биотита, образование аутигенных минералов Ti по биотиту, формирование трещин?	Формирование раннего (морского) порового кальцитового цемента, заполнение трещин	Формирование позднего порового кальцитового цемента; заполнение трещин	Коррозия / замещение компонентов карбонатными минералами (кальцитом, сидеритом)	–	Образование трещин, в результате зачлененных кальцитов	–
Карбонатные	Уплотнение, перекристаллизация (слабая сплошная и интенсивная пятнистая), послонная стилолитизация, трансформация минералов кремнезема в конкрециях, формирование прожилков?	Формирование глауконита в кавернах, формирование позднего спаритового цемента, пятнистая перекристаллизация?	Формирование кварцевого (халцедонового) цемента в оолитовых разностях, пиритизация кремневых конкреций. Формирование участков яснокристаллического кальцита (“мраморовидных”) в известняках	Доломитизация – от пятнистой неравномерной (включая формирование седловидного доломита) до сплошной, окремнение, частичное замещение карбонатных конкреций карбонатами минералами	Формирование микрокверн при доломитизации	Образование трещин (в результате зачлененных кальцитовых прожилков)	Растворение под давлением с формированием разориентированных стилолитов

представлены иллитом (см. табл. 1). Нельзя исключать, что какая-то его часть имеет вторичную природу и связана с трансформациями смектита или смешанослойных минералов, а также со вторичными процессами в ПШ – иллитизация типична для толщ, содержащих аркозы (Япаскурт, 2008; van de Kamp, 2016). Считается, что она сопровождается выделением воды и SiO_2 , иногда также Mg (Холодов, 1983; Махнач, 2000; Япаскурт, 2008; van de Kamp, 2008). При трансформации смектита в иллит в диа- и катагенезе теряется значительное количество воды – порядка 70% от изначально содержавшейся, и от 17 до 28 мас. % кремнезема по отношению к исходному его количеству в смектите (van de Kamp, 2008). Кремнезем переходит в раствор и мигрирует в осадочной толще, в том числе становясь регенерационным кварцевым цементом.

Роль индикатора стадийных преобразований могут играть изменения терригенного биотита (Коссовская, Шутов, 1956; Япаскурт, 2008). А.Г. Коссовская и В.Д. Шутов (1956) при изучении мезозойско–верхнепалеозойских отложений Верхоянья отмечали нарастающие с глубиной изменения этого минерала с констатацией его полного разрушения на поздних этапах преобразований. В метагенезе на месте биотита “остаются реликты в виде темных, полупрозрачных скоплений рудного (железисто-титанистого) тонкодисперсного вещества, иногда с кристалликами сидерита, иногда вместе с анатазом или с мельчайшими игольчатыми новообразованиями рутила (<...> при разрушении биотита из его кристаллической решетки выносятся катионы железа и титана)” (Япаскурт, 2008, с. 127).

До конца не ясно, считать описанные преобразования чешуек биотита укской свиты градационными или наложенными, так как они зафиксированы в образце песчаника с широко развитым регенерационным цементом (т. е. в более проницаемых отложениях по сравнению с вмещающими), а наблюдать трансформацию этого минерала сверху вниз по разрезу возможности не было. Тем не менее с учетом упомянутой информации о полной деградации биотита только в метагенезе и не очень высокой интенсивности его изменений в терригенных породах свиты вряд ли можно говорить о пред-метагенетических изменениях пород. Скорее, степень преобразования не выше, чем начало позднего катагенеза.

Переpleтение признаков стадийного и наложенного эпигенеза – характерная особенность карбонатных пород (Лебедев, 1992, с. 77). В связи с тем что однозначно отнести те или иные признаки к стадийным или наложенным не представляется возможным, такие процессы, как уплотнение, перекристаллизация и послойная стилолитизация, условно считаются нами стадийными, а остальные – наложенными. И к тем и к другим можно

приписать образование трещин (точнее, прожилков), которое происходит как при погружении осадочных толщ, так и при их воздымании. При таком подходе очевидно, что комплекс рассматриваемых эпигенетических преобразований карбонатных пород во многом обусловлен наложенными процессами.

Перечисленные признаки заставляют предполагать, что укская свита в стратотипе претерпела преобразования вплоть до начальных градаций позднего катагенеза (по В.Т. Фролову (2009)) или до среднего катагенеза (согласно Н.В. Логвиненко и Л.В. Орловой (1987)). Ранее стадийные преобразования глинисто-карбонатных пород этого разреза были оценены по результатам изучения геохимии органического вещества на уровне “нефтяного окна” (соотношение трисноргопанов Ts/Tm от 0.7 до 1.1) (Парфенова, Мельник, 2020). При этом отобранные из межбиогермного заполнения глинисто-карбонатные разности визуально изменены очень слабо в связи с тем, что примеси глинистого и органического вещества в карбонатах, как правило, оказывают замедляющее влияние на перекристаллизацию (Махнач, 2000; Гмид, 2006). Таким образом, уровень начальных градаций мезокатагенеза (Парфенова, Мельник, 2020) отражает единые фоновые термобарические условия, в которых находились укские отложения до прекращения прогрессивного эпигенеза (что справедливо по крайней мере в отношении той части свиты, которая сейчас принимает участие в геологическом строении Сулеймановской антиклинали).

Наложённые преобразования

Интенсивный аутигенез карбонатных минералов (цементация), развитие коррозионного цемента в терригенных породах, а также окремнение, доломитизация и сидеритизация известняков в сочетании с образованием разноориентированных стилолитов (вследствие *разновекторных тектонических напряжений*) носят наложенный характер. При этом часть минеральных фаз, вероятно, возникла при регрессивном эпигенезе.

Наложённые преобразования терригенных пород укской свиты не очень разнообразны. Среди них формирование позднего порового кальцитового цемента и коррозия им зерен силикокластики, а также метасоматическая сидеритизация. Вероятно, формирование трещин, впоследствии залеченных кальцитом, также можно считать наложенным процессом, связанным с тектоническими движениями.

Для карбонатных пород из *метасоматических процессов* наиболее характерны доломитизация и окремнение (Кузнецов, Скобелева, 2005; Лукин и др., 2009; Васильева, 2017; Тугарова, 2020). Активнее всего они протекают в проницаемых отложениях, а их продукты продолжают влиять на ха-

рактёр пустотного пространства пород. Доломитизация нередко приводит к значительному изменению фильтрационно-емкостных свойств (чаще к их улучшению) отложений (Лебедев, 1992; Морозов, 2009); окремнение, в свою очередь, влияет на пластичность/хрупкость пород и, соответственно, может увеличивать их проницаемость вследствие образования трещин при тектонических дислокациях (Гмид, 2006). Согласно схеме стадийных преобразований карбонатных пород М.А. Тугаровой (2020), процессы доломитизации и окремнения свойственны мезокатагенезу и являются следствием дегидратации минералов глинистых толщ с сопутствующим выносом из них кремнезема и магния. Однако катагенетическая природа растворов/флюидов необязательно свидетельствует о нахождении в зоне катагенеза протолита, подвергшегося метасоматозу.

В стратотипе укской свиты нами зафиксированы проявления метасоматических процессов, но их нельзя назвать доминирующими. Так, кремневые конкреции в свите распространены значительно меньше, нежели в подстилающей ее миньярской. Однако *окремнение* целых пластов оолитовых известняков авдырдаской толщи было возможным только при поступлении значительного количества кремнекислоты в составе раствора с высокой температурой. Возможно, источником кремнезема для регенерации кварца в песчаниках и для окремнения оолитовых известняков (с образованием в них халцедонового цемента) служил один и тот же раствор, возникший, вероятно, при масштабной иллитизации предшествующих глинистых минералов.

Даже в кислотных вытяжках (в том числе слабых кислот) проб карбонатных пород спектры редкоземельных элементов напоминают таковые глинистых отложений, свидетельствуя о том, что *метасоматическая доломитизация* известняков сопровождалась также некоторым привнесом редких, в том числе редкоземельных, элементов (Дуб и др., 2019). Таким образом, источником магния и сопутствующих элементов также могли служить растворы, отжатые из терригенных толщ (на данный момент сложно предположить, из каких именно). Остается неясным время проявления данного процесса. По данным Г.А. Каледы (1985) и В.П. Морозова (2009), метасоматические доломиты часто приурочены к антиклинальным поднятиям. Руководствуясь данной закономерностью, можно осторожно предположить, что масштабная доломитизация пачки интракластовых известняков манайсинской толщи происходила уже в постгерцинское время, после заложения Сулеймановской антиклинали БМА.

Процесс доломитизации, по-видимому, протекал в несколько этапов. Для одного из них была характерна генерация седловидного доломита (см. рис. 7в) с отчетливой зональностью, связанной с

неравномерным распределением Fe в кристаллах. Такая разновидность доломита могла возникнуть вследствие гидротермальных преобразований, так как он является индикатором температур 60–160°C (Radke, Mathis, 1980; Ma et al., 2021).

В составе изученного *железистого карбоната*, встреченного как в песчанике (обр. 22.10-6-10), так и в карбонатно-кремнистой породе (обр. 22.10-8-10), практически отсутствует Mg. Fe либо находится в самостоятельной карбонатной фазе (обр. 22.10-6-10), либо приурочено к внешним зонам кристаллов кальцита (обр. 22.10-8-10) (см. рис. 3, 6). В то же время отмечается, что анкерит $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$ в чистом виде в природе не встречается (Карбонаты, 1987; Патрунов, 1998), соответственно, более вероятно, что охарактеризованный ранее Fe-карбонат представлен сидеритом, по крайней мере в изученных на СЭМ образцах (сидерит также предполагался по результатам РСА в обр. 22.10-6-10). Выявленная последовательность преобразований указывает на то, что сидеритизация – наиболее поздний процесс в эпигенетической истории пород: по времени она следует за аутигенезом минералов в пустотах, регенерацией зерен кварца в песчаниках, вторичной кальцитизацией кремневых конкреций, перекристаллизацией, образованием разноориентированных стилолитов и прожилков в известняках. Соответственно, поздний метасоматический сидерит (или иной Fe-карбонат) – общий признак для пород разных пачек. Таким образом, начиная с определенной стадии преобразований, вторичные процессы становятся едины для всей нижней подсвиты. Возможно, подобная “афациальная природа” указывает на то, что описанные продукты являются следствием *регрессивного эпигенеза*. Известно, что коррозионные процессы активизируются при наложенных регрессивно-эпигенетических (низкотемпературных) изменениях (Япаскерт, 2008). Они могли протекать как при орогении – тиманской или герцинской (что более вероятно, так как последняя определила современное геологическое строение Урала), так и во время неотектонической активизации территории. Кроме того, для образования сидерита требуются восстановительные обстановки, поэтому, скорее всего, оно проходило при участии элизионных, а не поверхностных вод. Доля сидерита в изученных породах незначительна, следовательно, он мог возникнуть и за счет фиксации Fe^{2+} при перекристаллизации кальцита (Кринари, 2010).

В целом наложенные преобразования в рассматриваемом разрезе кажутся несколько более разнообразными по сравнению с фоновыми, что, по-видимому, является следствием богатой тектонической истории осадочно-породного бассейна, находившегося с определенного момента не в условиях платформы, а в пределах Уральско-складчатого-надвигового пояса. *Прочие наложенно-эпигенетические преобразования*. Вблизи несоглас-

ной границы с перекрывающими отложениями бакеевской свиты встречаются массы белого ясно-кристаллического кальцита, образование которых, вероятно, связано с процессами древнего гипергенеза. Преобразования карбонатных пород с увеличением размера кристаллов могут протекать и под воздействием пресных вод, однако укрупнение структуры в таком случае, согласно представлениям А.А. Махнача (2000), является следствием не столько перекристаллизации, сколько комбинации процессов растворения и цементации (аутигенного минералогенеза).

Сравнение с другими разрезами

Ранее в разрезе укской свиты на р. Басу у хут. Кулмас (Алатауский антиклинорий БМА) также были зафиксированы доломитизация и окремнение отложений (Сергеева и др., 2023). Эпигенез связывается авторами преимущественно с тектономагматическими процессами. Последними объясняется и омоложение глауконитовых датировок (663 ± 9 млн лет и 669 ± 16 млн лет (Зайцева и др., 2008)) на фоне более древнего возраста отложений (Сергеева и др., 2023).

Роль интрузий и эндогенных источников вещества в преобразованиях укской свиты Сулеймановской антиклинали нам кажется преувеличенной. Большинство флюидов происходят, скорее всего, все-таки из осадочных толщ, а тектоническая активизация могла приобретать значение только на определенных этапах эволюции осадочно-породного бассейна. Так или иначе, в сочетании с полученными ранее данными комплекс охарактеризованных изменений свидетельствует о заметном влиянии наложенных эпигенетических процессов на отложения верхней части верхнего рифея БМА. Тем не менее их масштаб не настолько велик по сравнению с комплексом преобразований, характерных для более древних отложений мегантиклинория (Анфимов, 1997).

ВЫВОДЫ

1. В богатом комплексе эпигенетических преобразований терригенных и карбонатных пород укской свиты выделены градационные (стадиальные) и наложенные изменения. Первые обусловлены изменением термобарических условий при погружении осадочных толщ, а также аутигенным собственным минералогенезом, и включают в себя механическое уплотнение, трансформацию неустойчивых глинистых минералов (в том числе иллитизацию), преобразования биотита с формированием Ti-содержащих фаз в терригенных породах (вероятно, к стадиальным преобразованиям может быть также отнесена регенерация кварца и КППШ) и уплотнение, перекристаллизацию (в том чис-

ле пятнистую) карбонатных пород и их послойное растворение под давлением. Ко вторым отнесены аутигенез карбонатных минералов и развитие коррозионного цемента в терригенных породах, а также образование разноориентированных стилолитов, окремнение, доломитизация и сидеритизация известняков.

2. Минеральные свидетели эпигенеза терригенных пород, дополненные текстурно-структурными признаками изменений пород карбонатных, указывают на фоновые изменения на уровне начала позднего катагенеза, что в целом не противоречит полученным Т.М. Парфеновой и Д.С. Мельником (2020) при изучении органического вещества данным о соответствии степени преобразований глинисто-карбонатных отложений начальным градациям мезокатагенеза, т. е. рубежу раннего и позднего катагенеза в случае двухэтапного деления или среднему катагенезу (Логвиненко, Орлова, 1987). Результаты исследований согласуются и с данными Л.В. Анфимова о том, что для верхнего рифея "глубинный катагенез... сохранил ряд признаков начального" (1997, с. 278). В то же время наложенно-эпигенетические процессы (главным образом метасоматические) отличались интенсивностью, а также разнообразием продуктов, но они проявлены локально.

3. Первично аркозовый состав песчаников укской свиты (по крайней мере в стратотипическом разрезе) не препятствовал интенсивной регенерации кварца. Обилие аутигенного КППШ предполагает привнос калия на одном из этапов эволюции осадочной толщи или его перераспределение внутри нижней подсвиты. Отдельные пачки и пласты известняков в укской свите служили проводниками флюидов (элизонных вод), что привело к окремнению и доломитизации отложений. Наиболее поздним эпигенетическим процессом является образование Fe-карбоната (сидерита).

Благодарности

Авторы искренне признательны Л.Г. Вакуленко, А.Н. Кольчугину и А.В. Маслову за тщательный анализ рукописи и комплекс критических замечаний, способствующих пересмотру ряда положений, уточнению выводов и улучшению формулировок. Обсуждение затрагиваемых в статье проблем с М.П. Покровским позволило по-новому взглянуть на привычные представления и лучше систематизировать материал. Во время работы над текстом конструктивные предложения получены также от М.Т. Крупенина и О.Д. Николенко. Авторы благодарны О.Л. Галаховой и Т.Я. Гуляевой за определение минерального состава пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анфимов Л.В. (1997) Литогенез в рифейских осадочных толщах Башкирского мегантиклинория (Ю. Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 290 с.
Багринцева К.И. (1999) Условия формирования и свой-

- ства карбонатных коллекторов нефти и газа. М.: РГГУ, 285 с.
- Беккер Ю.Р. (1961) Возраст и последовательность напластования отложений верхней части каратауской серии Южного Урала. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (9), 49-60.
- Вакуленко Л.Г. (2017) Роль постседиментационных процессов в формировании и изменении коллекторских свойств мезозойских терригенных пород Западной Сибири (история исследований). *Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге*. Тр. III Всерос. науч.-практ. седиментологического совещ. Томск: ЦППС НД, 20-32.
- Васильева К.Ю. (2017) Стадийность постседиментационных изменений карбонатных пород рифея – венда Куюмбинского месторождения и ее связь с геологической эволюцией Байкитской антеклизы (юго-запад Сибирской платформы). Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: СПбГУ, 138 с.
- Вассоевич Н.Б. (1983) Стадии литогенеза. *Справочник по литологии*. М.: Недра, 85-96.
- Гмид Л.П. (2006) Литологические аспекты изучения карбонатных пород-коллекторов. *Нефтегазов. геол. Теория и практика*, (1), 1-23.
- Дуб С.А. (2021) Верхнерифейско-вендские отложения Башкирского мегантиклинория Южного Урала: состояние изученности и стратиграфическое расчленение. *Геология и геофизика*, **62**(11), 1511-1530. <https://doi.org/10.15372/GiG2021120>
- Дуб С.А., Горбунова Н.П. (2019) Химический состав пород укской свиты верхнего рифея Южного Урала: связь с обстановками осадконакопления и постседиментационными преобразованиями. *Тр. ИГТ УрО РАН*, вып. 166, 52-58.
- Дуб С.А., Гражданкин Д.В. (2021) Литология и обстановки осадконакопления карбонатных отложений укской свиты верхнего рифея (неопротерозой) Южного Урала. *Литология и полез. ископаемые*, (6), 513-537. <https://doi.org/10.31857/S0024497X21060033>
- Дуб С.А., Мельничук О.Ю., Крупенин М.Т. (2024) Карбонатно-терригенные отложения нижнеукской подсвиты верхнего рифея в стратотипическом разрезе и их корреляция в пределах Башкирского мегантиклинория Южного Урала. *Литосфера*, **24**(3), 451-478. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-451-478>
- Дуб С.А., Чередниченко Н.В., Киселева Д.В., Горбунова Н.П., Гуляева Т.Я., Дерюгина Л.К. (2019) Поведение микроэлементов в кислотных вытяжках (уксусной, азотной и соляной) из терригенно-карбонатных пород укской свиты верхнего рифея Южного Урала. *Литосфера*, **19**(6), 919-944. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-6-919-944>
- Зайцева Т.С., Горохов И.М., Ивановская Т.А., Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Мельников Н.Н., Аракелянц М.М., Яковлева О.В. (2008) Мессбауэровские характеристики, минералогия и изотопный возраст (Rb-Sr и K-Ar) верхнерифейских глауконитов укской свиты Южного Урала. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **14**(3), 3-24.
- Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Горожанин В.М., Горохов И.М., Ивановская Т.А., Константинова Г.В. (2019) Основание венда на Южном Урале: Rb-Sr возраст глауконитов бакеевской свиты. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **27**(5), 82-96. <https://doi.org/10.31857/S0869-592X27582-96-12099>
- Зубков М.Ю. (2017) Тектоногидротермальные процессы в юрских отложениях Западной Сибири. *Геология нефти и газа*, (1), 60-76.
- Каледа Г.А. (1985) Изменчивость отложений на тектонических структурах. М.: Наука, 192 с.
- Карбонаты. Минералогия и химия. (1987) (Под ред. Р.Дж. Ридера). М.: Мир, 496 с.
- Козлов В.И. (1982) Верхний рифей и венд Южного Урала. М.: Наука, 128 с.
- Кольчугин А.Н., Морозов В.П., Королев Э.А., Имменхаузер А., Вальтер Б. (2019) Некоторые особенности вторичных преобразований ниже и среднекаменноугольных нефтеносных коллекторов Волго-Уральского региона. *Новые идеи в геологии нефти и газа*. Сб. науч. тр. (Отв. ред. А.В. Ступакова). М.: Перо, 222-226.
- Копелиович А.В. (1965) Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы. М.: Наука, 349 с.
- Коссовская А.Г., Шутов В.Д. (1956) Характер и распределение минеральных новообразований в разрезе мезо-палеозойских отложений Западного Верхоянья. *О вторичных изменениях осадочных пород*. Сб. ст. (Отв. ред. чл.-кор. АН СССР Л.В. Пустовалов). М.: АН СССР, 135-168.
- Кринари Г.А. (2010) Литогенез и минералогия нефтеносных осадочных пород. Ч. I. Стадии гипергенеза – диагенеза. Казань: Каз. ун-т, 64 с.
- Крупенин М.Т. (1999) Условия формирования сидеритонной бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал). Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 257 с.
- Крылов И.Н. (1967) Рифейские и нижнекембрийские строматолиты Тянь-Шаня и Каратау. М.: Наука, 78 с.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Маслов А.В., Горохов И.М., Прасолов Э.М., Крупенин М.Т., Кислова И.В. (2006) Sr- и C-изотопная хемотратиграфия типового разреза верхнего рифея (Южный Урал): новые данные. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **14**(6), 25-53.
- Кузнецов В.Г. (2007) Литология. Осадочные горные породы и их изучение. М.: Недра-Бизнесцентр, 511 с.
- Кузнецов В.Г., Скобелева Н.М. (2005) Процесс окремнения рифейских карбонатных отложений (Юрубчено-Тохомская зона, Сибирская платформа). *Литология и полез. ископаемые*, (6), 637-650.
- Лебедев Б.А. (1992) Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. Л.: Недра, 239 с.
- Логвиненко Н.В., Орлова Л.В. (1987) Образование и изменение осадочных пород на континенте и в океане. Л.: Недра, 237 с.
- Лукин А.Е., Зоценко Н.А., Харахинов В.В., Донцов В.В., Наумко И.М. (2009) Литогеохимические факторы формирования нафтидоносных метасоматических доломитов рифея Восточной Сибири. *Геол. журн.*, (1), 7-24.
- Маслов А.В. (1997) Осадочные ассоциации рифея стратотипической местности (эволюция взглядов на условия формирования, литофациальная зональность). Екатеринбург: УрО РАН, 220 с.
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Дуб С.А., Мельник Д.С., Парфенова Т.М., Колесников А.В., Чередниченко Н.В., Киселева Д.В. (2019) Укская свита верхнего рифея Южного Урала: седиментология и геохимия (первые результаты исследований). *Литосфе-*

- ра, **19**(5), 659-686. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-659-686>
- Махнач А.А. (2000) Стадиальный анализ литогенеза. Минск: БГУ, 255 с.
- Морозов В.П. (2009) Седиментогенез и постседиментационные изменения палеозойских карбонатных отложений востока Восточно-Европейской платформы. Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Казань: Каз. ун-т, 48 с.
- Парфенова Т.М., Мельник Д.С. (2020) Геохимия рассеянного органического вещества пород укской свиты (верхний рифей, Южный Урал). *От анализа вещества – к бассейновому анализу*. Мат-лы 13 Урал. литол. совещ. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 190-192.
- Патрунов Д.К. (1998) Надкласс карбонатные породы – карбонатолиты. Малые карбонатные породы – поликарбонатолиты. *Систематика и классификация осадочных пород и их аналогов*. (Отв. ред. В.Н. Шванов). СПб.: Недра, 184-196.
- Петров П.Ю. (2011) Molar tooth structures: механизм формирования и специфика карбонатного диагенеза в позднем докембрии (сухотунгусинская свита рифея Туруханского поднятия Сибири). *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **19**(3), 3-26.
- Постседиментационные изменения карбонатных пород и их значение для историко-геологических реконструкций. (1980) (Отв. ред. В.Г. Кузнецов). М.: Наука, 102 с.
- Пустовалов Л.В. (1940) Петрография осадочных пород. М.; Л.: Гостоптехиздат. Ч. 1. 476 с.; Ч. 2. 420 с.
- Рухин Л.Б. (1961) Основы литологии. Л.: Гостоптехиздат, 779 с.
- Рянская А.Д., Щапова Ю.В., Гуляева Т.Я., Галахова О.Л., Петрищева В.Г., Горбунова Н.П., Татарина Л.А. (2015) Полнопрофильный рентгенодифракционный анализ фазово-минерального состава пород-коллекторов нефти и газа с использованием программы SIROQUANT (на примере искусственных смесей). *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 162, 267-275.
- Сергеева Н.Д., Пучков В.Н., Дьякова С.А., Зайцева Т.С. (2023) Опорный разрез укской свиты верхнего рифея (каратавия) в Алатауском антиклинории (Южный Урал). *Литосфера*, **23**(1), 38-51.
- Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология. (1983) (Отв. ред. Б.М. Келлер, Н.М. Чумаков). М.: Наука, 184 с.
- Страхов Н.М., Логвиненко Н.В. (1959) О стадиях осадочного породообразования и их наименовании. *Докл. АН СССР*, **125**(2), 389-392.
- Тугарова М.А. (2020) Вторичные изменения карбонатных пород нефтегазоносных комплексов. *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*, (4), 18-23.
- Фролов В.Т. (1992) Литология. Т. 1. М.: МГУ, 336 с.
- Фролов В.Т. (2009) Катагенез. *Большая российская энциклопедия*. Т. 13. М.: БРЭ, 304.
- Холодов В.Н. (1983) Постседиментационные преобразования в элизионных бассейнах (на примере Восточного Предкавказья). М.: Наука, 152 с.
- Холодов В.Н. (1970) О терминах, применяемых при изучении вторичных изменений осадочных пород. *Литология и полез. ископаемые*, (6), 91-102.
- Шутов В.Д. (1967) Классификация песчаников. *Литология и полез. ископаемые*, (5), 86-103.
- Юдович Я.Э. (2008) Размышления об инфильтрационном эпигенезе. *Изв. Томского политех. ун-та*, **312**, (1), 4-10.
- Япаскурт О.В. (2008) Генетическая минералогия и стадийный анализ процессов осадочного породо- и рудообразования. М.: ЭСЛАН, 356 с.
- Япаскурт О.В. (2016) Стадиальный анализ минеральных свидетелей динамики процессов формирования и эволюции вещества осадочных пород – перспективное научное направление литологии и нефтегазовой геологии. *Георесурсы*, **18**(1), 64-68.
- Dunham R.J. (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *AAPG Memoir. Classification of carbonate rocks*. (Ed. by W.E. Ham). V. 1, 108-121.
- Immenhauser A. (2022) On the delimitation of the carbonate burial realm. *Depos. Rec.*, **8**(2), 524-574. <https://doi.org/10.1002/dep2.173>
- Kriscautzky A., Kah L.C., Bartley J.K. (2022) Molar-Tooth Structure as a Window into the Deposition and Diagenesis of Precambrian Carbonate. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **50**, 205-230. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-031621-080804>
- Ma P., Lin C., Jähren J., Dong C., Ren L., Hellevang H. (2021) Cyclic zoning in authigenic saddle dolomite-ankerite: Indications of a complex interplay between faulting and diagenetic alteration. *Chem. Geol.*, **559**, 119831. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119831>
- Radke B.M., Mathis R.L. (1980) On the formation and occurrence of saddle dolomite. *J. Sediment. Petrol.*, **50**(4), 1149-1168. <https://doi.org/10.1306/212F7B9E-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- van de Kamp P.C. (2008) Smectite-illite-muscovite transformations, quartz dissolution and silica release in shales. *Clays Clay Miner.*, **56**(1), 66-81. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2008.0560106>
- van de Kamp P.C. (2016) Potassium distribution and metasomatism in pelites and schists: How and when, relation to postdepositional events. *J. Sediment. Res.*, **86**, 683-711. <https://doi.org/10.2110/jsr.2010.081>

REFERENCES

- element behaviour in acidic leachates (acetic, nitric and hydrochloric) from siliciclastic-carbonate rocks of the Upper Riphean Uk formation in the Southern Urals. *Lithosphere (Russia)*, **19**(6), 919-944. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-6-919-944>
- Dub S.A., Gorbunova N.P. (2019) Upper Riphean Uk Formation chemical composition in the Southern Urals: Relation to sedimentary environments and diagenesis. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 166, 52-58. (In Russ.)
- Dub S.A., Grazhdankin D.V. (2021) Carbonate Sedimentology of the Upper Riphean (Neoproterozoic) Uk Formation, Southern Urals. *Lithol. Miner. Res.*, **56**, 487-508 (translated from *Litol. Polez. Iskop.*, (6), 513-537). <https://doi.org/10.1134/S0024490221060031>
- Dub S.A., Melnichuk O.Yu., Krupenin M.T. (2024) Carbonate-siliciclastic deposits of the Lower Uk Subformation (Neoproterozoic) in the stratotype section and its correlation within Bashkirian Mega-Anticlinorium of the Southern Urals. *Lithosphere (Russia)*, **24**(3), 451-478. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-451-478>
- Dunham R.J. (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *AAPG Memoir. Classification of carbonate rocks*. (Ed. by W.E. Ham). V. 1, 108-121.
- Frolov V.T. (1992) Lithology. V. 1. Moscow, MGU, 336 p. (In Russ.)
- Frolov V.T. (2009) Catagenesis. *The Great Russian Encyclopedia*. V. 13. Moscow, BRE Publ., 304. (In Russ.)
- Gmid L.P. (2006) Lithological aspects of oil and gas carbonate reservoirs study. *Neftegazovaya Geol. Teoriya i praktika*, (1), 1-23. (In Russ.)
- Immenhauser A. (2022) On the delimitation of the carbonate burial realm. *Depos. Rec.*, **8**(2), 524-574. <https://doi.org/10.1002/dep2.173>
- Kaleda G.A. (1985) Deposits alteration in tectonic structures. Moscow, Nauka Publ., 192 p. (In Russ.)
- Kholodov V.N. (1970) About terminology applied to sedimentary rocks alteration study. *Litol. Polez. Iskop.*, (6), 91-102. (In Russ.)
- Kholodov V.N. (1983) Diagenesis alterations in elisium basins (by example of the Eastern Fore-Caucasus). Moscow, Nauka Publ., 152 p. (In Russ.)
- Kol'chugin A.N., Morozov V.P., Korolev E.A., Immenhauser A., Val'ter B. (2019) Some features of secondary alterations of the Lower and Middle Carboniferous oil bearing reservoirs in the Volga-Urals region. *New ideas in oil and gas geology*. Coll. of scientific papers. (Ed. by A.V. Stupakova). Moscow, Pero, 222-226. (In Russ.)
- Kopeliovich E.A. (1965) Ancient strata epigenesis in the Russian platform south-west. Moscow, Nauka Publ., 349 p. (In Russ.)
- Kossovskaya A.G., Shutov V.D. (1956) Mineral growth features and types in the Mesozoic-Paleozoic rocks in the western Privrkhoyanie. *About sedimentary rocks alteration*. Coll. of articles. (Ed. by L.V. Pustovalov). Moscow, AN SSSR, 135-168. (In Russ.)
- Kozlov V.I. (1982) Riphean and Vendian in the southern Urals. Moscow, Nauka Publ., 128 p. (In Russ.)
- Krinari G.A. (2010) Oil-bearing sedimentary rocks lithogenesis and mineralogy. Pt I. Hypergenesis and early diagenesis stage. Kazan, Kazan. Un-t, 64 p. (In Russ.)
- Kriscautzky A., Kah L.C., Bartley J.K. (2022) Molar-Tooth Structure as a Window into the Deposition and Diagenesis of Precambrian Carbonate. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **50**, 205-230. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-031621-080804>
- Krupenin M.T. (1999) Lower Riphean Bakal siderite-bearing formation genesis (Southern Urals). Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 257 p. (In Russ.)
- Krylov I.N. (1967) Riphean and Lower Cambrian stromatolites in the Tenshu and Karatau. Moscow, Nauka Publ., 78 p. (In Russ.)
- Kuznetsov A.B., Gorokhov I.M., Semikhatov M.A., Kislova I.V., Maslov A.V., Krupenin M.T., Prasolov E.M. (2006) New data on Sr-and C-isotopic chemostratigraphy of the Upper Riphean type section (southern Urals). *Stratigr. Geol. Correl.*, **14**(6), 602-628 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **14**(6), 25-53).
- Kuznetsov V.G. (2007) Lithology. Sedimentary rocks and their study. Moscow, Nedra-Biznescentr Publ., 511 p. (In Russ.)
- Kuznetsov V.G., Skobeleva N.M. (2005) Silicification of Riphean carbonate sediments (Yurubcha-Tokhomo zone, Siberian craton). *Lithol. Miner. Res.*, **40**(6), 552-563 (translated from *Litol. Polez. Iskop.*, (6), 637-650). <https://doi.org/10.1007/s10987-005-0052-6>
- Lebedev B.A. (1992) Epigenetic processes geochemistry in the sedimentary basins. Leningrad, Nedra Publ., 239 p. (In Russ.)
- Logvinenko N.V., Orlova L.V. (1987) Formation and change of sedimentary rocks on the continent and in the ocean. Leningrad, Nedra Publ., 237 p. (In Russ.)
- Lukin A.E., Zoshchenko N.A., Harahinov V.V., Doncov V.V., Naumko I.M. (2009) Lithogeodynamic genesis factors of the Riphean naphthide-bearing metasomatic dolomites in the Eastern Siberia. *Geol. Zhurn.*, (1), 7-24. (In Russ.)
- Ma P., Lin C., Jahren J., Dong C., Ren L., Hellevang H. (2021) Cyclic zoning in authigenic saddle dolomite-ankerite: Indications of a complex interplay between fault-rupturing and diagenetic alteration. *Chem. Geol.*, **559**, 119831. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119831>
- Makhnach A.A. (2000) Post-depositional transformations analysis. Minsk, BGU, 255 p. (In Russ.)
- Maslov A.V. (1997) Riphean stratotype area sedimentary sequences (viewpoint development about genesis conditions, lithofacies zoning). Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 220 p. (In Russ.)
- Maslov A.V., Grazhdankin D.V., Dub S.A., Melnik D.S., Parfenova T.M., Kolesnikov A.V., Cherednichenko N.V., Kiseleva D.V. (2019) Sedimentology and geochemistry of the Uk Formation, Upper Riphean, the Southern Urals. *Lithosphere (Russia)*, **19**(5), 659-686. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-659-686>
- Morozov V.P. (2009) Sedimentation and diagenetic alterations of the Paleozoic carbonate rocks in the Eastern-European platform east. Author's abstract. diss. ... doc. geol.-min. sci. Kazan, Kazan. Un-t, 48 p. (In Russ.)
- Parfenova T.M., Melnik D.S. (2020) Dispersed organic matter geochemistry of the Uk Formation rocks (Upper Riphean, Southern Urals). *From matter analysis to basin analysis*. 13 Ural lithological meeting proc. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 190-192. (In Russ.)
- Patrunov D.K. (1998) Carbonate rocks superclass – carbonatolites. Hypcarbonate rocks – polycarbonatolites. *Sedimentary rocks and their analogs systematic and classification*. (Ed. by V.N. Shvanov). St.Petersburg, Nedra

- Publ., 184-196. (In Russ.)
- Petrov P.Yu. (2011) Molar tooth structures: Formation and specificity of carbonate diagenesis in the Late Precambrian, Middle Riphean Sukhaya Tunguska Formation of the Turukhansk Uplift, Siberia. *Stratigr. Geol. Correl.*, **19**(3), 247-267 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **19**(3), 3-26). <https://doi.org/10.1134/S0869593811030087>
- Pustovalov L.V. (1940) Sedimentary rocks petrography. Moscow; Leningrad, Gostoptekhizdat Publ. V. 1. 476 p.; V. 2. 420 p. (In Russ.)
- Radke B.M., Mathis R.L. (1980) On the formation and occurrence of saddle dolomite. *J. Sediment. Petrol.*, **50**(4), 1149-1168. <https://doi.org/10.1306/212F7B9E-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Riphean Stratotype. Stratigraphy. Geochronology. (1983) (Ed. by B.M. Keller, N.M. Chumakov). Moscow, Nauka Publ., 184 p. (In Russ.)
- Rukhin L.B. (1961) Lithology basics. Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 779 p. (In Russ.)
- Ryanskaya A.D., Shchapova Yu.V., Gulyaeva T.Ya., Galahova O.L., Petrishcheva V.G., Gorbunova N.P., Tatarnova L.A. (2015) Full-profile X-ray diffraction analysis of the phase-mineral composition of oil and gas reservoir rocks using the SIROQUANT program (using artificial mixtures as an example). *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 162, 267-275. (In Russ.)
- Sergeeva N.D., Puchkov V.N., Dyakova S.A., Zaitseva T.S. Reference section of the Uk Formation of the Upper Riphean (Karatavian) in the Alatau anticlinorium (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, **23**(1), 38-51. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-1-38-51>
- Shutov V.D. (1967) Classification of sandstones. *Litol. Polez. Iskop.*, (5), 86-103. (In Russ.)
- Strakhov N.M., Logvinenko N.V. (1959) About the stages of sedimentary rock formation and their names. *Dokl. AN SSSR*, **125**(2), 389-392. (In Russ.)
- Tugarova M.A. (2020) Carbonate rocks alteration in oil and gas complexes. *PRONEFT. Professionalno o nefti*, (4), 18-23. (In Russ.)
- Vakulenko L.G. (2017) Diagenesis processes role in the genesis and alteration of reservoir characteristics of the Mesozoic clastic rocks in the Western Siberia (history). *Modern sedimentology struggles in oil and gas engineering*. III All-Russia research and practice Sedimentological conf. proc. Tomsk, TsPPS ND, 20-32. (In Russ.)
- van de Kamp P.C. (2008) Smectite-illite-muscovite transformations, quartz dissolution and silica release in shales. *Clays Clay Miner.*, **56**(1), 66-81. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2008.0560106>
- van de Kamp P.C. (2016) Potassium distribution and metasomatism in pelites and schists: How and when, relation to postdepositional events. *J. Sediment. Res.*, **86**, 683-711. <https://doi.org/10.2110/jsr.2010.081>
- Vasil'eva K.A. (2017) Riphean and Vendian carbonate rocks diagenesis stadium in the Kuyumba field and it's relation to geological evolution of the Bajkit antecline (south-west Siberian platform). Cand. geol. and min. sci. thesis. St.Petersburg, SPbGU, 138 p. (In Russ.)
- Vassoevich N.B. (1983) Lithogenesis stages. Moscow, Nedra Publ., 85-96. (In Russ.)
- Yapaskurt O.V. (2008) Genetical mineralogy and post-depositional transformations analysis of the sedimentary rocks and ore genesis processes. Moscow, ESLAN Publ., 356 p. (In Russ.)
- Yapaskurt O.V. (2016) Post-depositional transformations analysis of mineral evidence of the dynamics of the formation and evolution processes of sedimentary rock matter is a promising scientific direction in lithology and oil and gas geology. *Georesursy*, **18**(1), 64-68. (In Russ.)
- Yudovich Yu.E. (2008) Contemplation about infiltration epigenesis. *Izv. Tomskogo politekhn. Un-ta*, **312**(1), 4-10. (In Russ.)
- Zaitseva T.S., Gorokhov I.M., Kuznetsov A.B., Mel'nikov N.N., Yakovleva O.V., Ivanovskaya T.A., Semikhatov M.A., Arakelyants M.M. (2008) Mössbauer characteristics, mineralogy and isotopic age (Rb-Sr, K-Ar) of Upper Riphean glauconites from the Uk Formation, the southern Urals. *Stratigr. Geol. Correl.*, **16**(3), 227-247 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **16**(3), 3-25). <https://doi.org/10.1134/S0869593808030015>
- Zaitseva T.S., Kuznetsov A.B., Gorozhanin V.M., Gorokhov I.M., Ivanovskaya T.A., Konstantinova G.V. (2019) The lower boundary of the Vendian in the Southern Urals as evidenced by the Rb-Sr age of glauconites of the Bakkevo formation. *Stratigr. Geol. Correl.*, **27**(5), 573-587 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **27**(5), 82-96). <https://doi.org/10.1134/S0869593819050083>
- Zubkov M.Yu. (2017) Tectonic-hydrothermal processes in the Jurassic rocks in the Western Siberia. *Geologiya Nefti i Gaza*, (1), 60-76. (In Russ.)