

Метаморфизм и метасоматизм карбонатных пород в обрамлении Суундукского гранитогнейсового массива (Южный Урал)

А. Ю. Кисин, Д. А. Озорнин, М. Е. Притчин, В. В. Мурзин

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: kissin@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023 г., принята к печати 10.11.2023 г.

Объект исследования. Карбонатные породы в обрамлении Суундукского гранитогнейсового массива Восточно-Уральского поднятия (Ю. Урал). **Цель.** Установление возможной петрологической и геохимической зональности в карбонатных породах метаморфического обрамления гранитогнейсового массива. Выявление структурных закономерностей распределения и характера взаимоотношений между карбонатными породами разных типов. **Материалы и методы.** При проведении экспедиционных работ использованы методы полевой структурной геологии и минералогии. Образцы карбонатных пород отобраны по профилям вкрест простирания пород. Содержание петрогенных элементов производилось методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометрах СРМ-35 и EDX-8000, редких и рассеянных элементов – методом ICP-MS на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000. **Результаты.** Карбонатные породы представлены кальцитовым, Mg-кальцитовым, доломитовым, кальцит-доломитовым мраморами и органогенными мраморизованными известняками (C_{1-2}). Зональность в карбонатном обрамлении южной части массива не выявлена, исключая метаморфическую зональность: мраморы, а на удалении – мраморизованные известняки. На раннем коллизионном этапе формировалась терригенно-карбонатная толща. В конце C_2 , в связи с региональным метаморфизмом и формированием гранитогнейсовой купольной структуры, на участках движения метаморфогенных флюидов известняки подверглись Mg-метасоматозу с образованием дометаморфических доломитов с реликтами фауны C_{1-2} возраста. В результате прогрессивного динамотермального метаморфизма в условия стресса метасоматические доломиты местами испытали дедоломитизацию с образованием кальцитового мрамора с полигональнозернистой структурой; этот мрамор формировался и по известнякам. В условиях стресса кальцитовый мрамор выжимался по ослабленным зонам в направлении снижения всестороннего давления, т. е. вверх. Имели место пластические и квазипластические деформации, метаморфическая перекристаллизация, метасоматические изменения. На участках движения метаморфогенных флюидов формировался Mg-кальцитовый мрамор с акцессорным красным корундом, флогопитом, Ст-турмалином, Ст-мусковитом. На раннем регрессивном этапе на участках движения флюидов вновь проявился Mg-метасоматоз с образованием доломит-кальцитового мрамора с акцессорным графитом, тремолитом, Ст-турмалином, пиритом. Длительностью и разнообразием процессов мраморизации объясняется отсутствие явно выраженной зональности мраморов в обрамлении гранитогнейсового массива. **Выводы.** Гранитогнейсовый массив служил центром зонального метаморфизма. На прогрессивном и регрессивном этапах метаморфизма ранне- и среднекаменноугольные известняки в обрамлении массива испытывали метаморфические и метасоматические преобразования с образованием мраморов различного состава; имели место пластические и квазипластические деформации, реоморфические перемещения кальцитового мрамора. Отчетливой зональности в мраморах не выявлено.

Ключевые слова: мрамор, известняк, метаморфизм, метасоматизм, гранитогнейсы, Урал

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания № Гос. учета НИОКТР 123011800011-2 “Рудообразующие процессы и закономерности размещения месторождений полезных ископаемых во внутриплитных коллизионно-складчатых поясах”

Metamorphism and metasomatism of carbonate rocks in the frame of the Suunduk granite-gneiss massif (Southern Urals)

Alexander Yu. Kisin, Danil A. Ozornin, Mikhail E. Pritchkin, Valerii V. Murzin

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia

Received 30.05.2023, accepted 10.11.2023

Для цитирования: Кисин А.Ю., Озорнин Д.А., Притчин М.Е., Мурзин В.В. (2024) Метаморфизм и метасоматизм карбонатных пород в обрамлении Суундукского гранитогнейсового массива (Южный Урал). *Литосфера*, 24(4), 642–660. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-642-660>

For citation: Kisin A.Yu., Ozornin D.A., Pritchkin M.E., Murzin V.V. (2024) Metamorphism and metasomatism of carbonate rocks in the frame of the Suunduk granite-gneiss massif (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, 24(4), 642–660. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-642-660>

Research subject. Carbonate rocks in the frame of the Suunduk granite-gneiss massif of the East Ural uplift (Southern Urals). **Aim.** Determination of possible petrological and geochemical zonation in carbonate rocks of the metamorphic frame of the granite-gneiss massif. Identification of structural regularities of distribution and the character of relationships between carbonate rocks of different types. **Materials and Methods.** Expedition works were carried out using the methods of field structural geology and mineralogy. Samples of carbonate rocks were selected along the profile transverse to the strike of rocks. The contents of petrogenic elements were determined by X-ray fluorescence analysis using CPM-35 and EDX-8000 spectrometers; rare and trace elements were determined by ICP-MS using an inductively coupled plasma ELAN 9000 mass spectrometer. **Results.** Carbonate rocks are represented by calcite marbles, Mg-calcite marbles, dolomite marbles, calcite-dolomite marbles, and organogenic marmorized limestones (C_{1-2}). Zonality in the carbonate framing of the southern part of the massif was identified, apart from metamorphic zonality: marbles and marmorized limestones in the distance. At the early collision stage, a terrigenous-carbonate sequence was formed. At the end of C_2 , due to regional metamorphism and formation of a granite-gneiss dome structure, in the areas of movement of metamorphogenic fluids, limestones underwent Mg-metasomatism with the formation of pre-metamorphic dolomites with relics of fauna of C_{1-2} age. As a result of progressive dynamothermal metamorphism, under stress conditions, metasomatic dolomites in places experienced dedolomitization, with the formation of calcite marble with a polygonal-grained structure; this marble was also formed on limestones. Under stress, calcite marble was squeezed out along weakened zones in the direction of pressure drop, i.e. upward. This process was associated with plastic and quasi-plastic deformations, metamorphic recrystallization, metasomatic alterations. Mg-calcite marble with accessory red corundum, phlogopite, Cr-tourmaline, and Cr-muscovite was formed in the areas of movement of metamorphogenic fluids. At the early regressive stage, Mg-metasomatism reappeared in the fluid movement areas with the formation of dolomite-calcite marble with accessory graphite, tremolite, Cr-tourmaline, and pyrite. The lack of a pronounced zonality of marbles in the frame of the granite-gneiss massif can be explained by the duration and variety of marmorization processes. **Conclusion.** The granite-gneiss massif was the center of zonal metamorphism. At the progressive and regressive stages of metamorphism, the earlier- middle-carboniferous limestones in the frame of the massif underwent metamorphic and metasomatic transformations with the formation of marbles of various compositions; there were plastic and quasi-plastic deformations, rheomorphic displacements of calcite marble. There is no obvious zonality in the marbles.

Keywords: marble, limestone, metamorphism, metasomatism, granite-gneiss, Ural

Funding information

The work was carried out within the framework of the state assignment on the topic No. 123011800011-2 "Ore-forming processes and regularities of mineral deposits placement in intraplate collisional-folded belts"

ВВЕДЕНИЕ

В широтном направлении на Урале выделяются (с запада на восток): Предуральский краевой прогиб, Западно-Уральская зона складчатости, Центрально-Уральское поднятие, Тагило-Магнитогорский прогиб, Восточно-Уральское поднятие, Восточно-Уральский прогиб и Зауральское поднятие (в современной терминологии – мегазоны). В составе Восточно-Уральского поднятия имеется несколько крупных антиклинорий, сложенных гранитогнейсовыми массивами и анатектическими гранитами, входящими в так называемую Главную Гранитную ось Урала (с севера на юг): Мурзинско-Адуйский, Кочкарский, Джабык-Карагайский и Суундукский. Общими для них являются купольный тектогенез, зональный метаморфизм и карбонатные породы в обрамлении, различающиеся по химическому и минеральному составу, структуре и минерации. При геологическом картировании эти карбонатные толщи геологи пытаются стратифицировать по времени накопления осадков, игнорируя их возможные метасоматические изменения, способность к неограниченным пластическим деформациям и перекристаллизации в условиях стресса и повышенных температур.

В целях изучения зональности карбонатных пород в метаморфическом обрамлении гранитогнейсового купола нами проведены полевые и лабораторные исследования карбонатных пород в южной половине Суундукского антиклинория, отличающегося меньшими размерами и относительно хорошей обнаженностью толщ.

Общие сведения о карбонатных породах в метаморфическом обрамлении гранитогнейсовых массивов Восточно-Уральской мегазоны

Ранее наиболее детально карбонатные породы изучались в Кочкарском антиклинории (Южный Урал) в связи с обнаружением в них рубин-шпинелевой минерализации на Кучинском месторождении (Кисин, 1991; Кисин и др., 2016). Последующие наши исследования показали, что выделенные типы карбонатных пород (мраморов и мраморизованных известняков) характерны и для обрамлений других гранитогнейсовых массивов Восточно-Уральской мегазоны, в том числе Суундукского.

Типы мраморов. На Кучинском месторождении рубинов выделены три основных типа мраморов (Кисин, 1991).

1 тип. Кальцитовый мрамор. Светлые, массивные, средне- и крупнозернистые кальцитовые породы полигональнозернистой структуры. Кальцит полупрозрачный, обычно не деформированный. Содержание MgO менее 0.01 мас. %. Имеют площадное распространение.

2 тип. Магнезиально-кальцитовый мрамор. Голубоватые, зеленоватые, белые и грязно-белые средне- и крупнозернистые мраморы панидиобластовой структуры. Представлены линзовидными, сильно уплощенными телами. Кальцит обычно сильно деформирован, вплоть до разлистования. Содержание MgO 0.1 мас. %.

3 тип. Доломит-кальцитовый (двукарбонатный) мрамор. Светлая, мелко-среднезернистая массивная порода с пойкилобластовой структурой. Содержание MgO достигает 17–22 мас. %.

Особенности залегания мраморов различных типов. Кальцитовый мрамор 1 типа разбит субвертикальными трещинами кливажа на плиты толщиной в среднем около 0.3–0.5 м с укрупнением размеров зерен кальцита к центру плиты. Азимут простирания кливажа согласен границам ближайших купольных структур. Гранобластовая структура, почти полное отсутствие деформаций кальцита и развитый кливаж течения позволяют отнести кальцитовые мраморы к рекристаллизованным.

Mg-кальцитовый мрамор встречается относительно редко, слагая небольшие по площади, но сложные по конфигурации участки среди кальцитового мрамора; отчетливо контролируются трещинами кливажа. Переходы к мрамору 1 типа размытые, не определяемые. Наблюдения над мелкими телами показывают, что форма их столбообразная, а сама порода рассланцована. Мрамор 2 типа нередко содержит рубиновую минерализацию, сопровождающуюся флогопитом, Ст-мусковитом, апатитом, Al-хлоритом, пиритом, ангидритом, в виде рассеянной вкрапленности (ранняя генерация) и гнездообразной в минерализованных трещинах кливажа (поздняя генерация). Гнезда минерализации также имеют столбообразную форму. Все перечисленные признаки свидетельствуют в пользу образования мрамора 2 типа в результате перекристаллизации в высокотемпературных условиях при участии флюидов.

Доломит-кальцитовый мрамор встречается в виде небольших тел среди мрамора 2 типа и нередко содержит его реликты. Реже наблюдается среди мрамора 1 типа. Тела мрамора 3 типа обычно имеют плитообразную форму и контролируются трещинами кливажа, реликты которых угадываются по плоскопараллельным выдержанным узким зонам минерализации. Порода массивная. Границы тел достаточно резкие, определяемые в интервале 1–2 см. Нередко содержит рубины, по которым развивается Mg-шпинель. Перечисленные признаки однозначно указывают на образование мрамора

3 типа в результате магнезиального метасоматоза мрамора 2 типа.

Дайки гранитных пегматитов секут кливаж и рассланцевание в мраморах 1 и 2 типов, но сами секутся трещинами сдвига в интервалах двукарбонатного, массивного мрамора. Следовательно, мраморы 1 и 2 типов додайковые, а 3 типа – постдайковые.

По результатам изучения карбонатных пород восточной части Кочкарского антиклинория (Кисин, 2007) к этим трем типам добавились мраморизованные, битуминозные, органогенные известняки (C_{2v}) и дометаморфические метасоматические мелкозернистые доломиты с реликтами фаунистических остатков C_{2v} возраста. Будины и реликты доломитов наблюдаются в мраморе 1 и 2 типов.

Все карбонатные породы Кочкарского антиклинория при раскалывании издают запах сероводорода.

Геология Суундукского антиклинория

Суундукский антиклинорий – удлиненный в меридиональном направлении куполовидный массив с метаморфическим обрамлением (рис. 1). Геологическое описание приводится по (Тевелев и др., 2018). В строении купольной структуры участвуют амфиболиты, плагиогнейсы, гнейсы и кристаллические сланцы кусаканской толщи (RF₁?ks). Магматические породы представлены гранитоидами неплывовского комплекса и гранитами джабыкско-санарского комплекса. В гранитогнейсовом массиве распространены дайки гранитов и пегматитов, в том числе с бериллом. Все границы тектонические.

Ширина метаморфического обрамления гранитогнейсового массива около 300 м (см. рис. 1). В южной части антиклинория распространены карбонатные породы, отнесенные на юге и юго-востоке к биргильдинской толще (C_{1bg}), а на западе – к каморзинской (C_{1-kn}). Биргильдинская толща сложена преимущественно мраморизованными известняками, мраморами и доломитами. По фаунистическим остаткам возраст толщ оценен как поздневизейско-серпуховский. Среди карбонатных пород здесь выделены: 1) мраморы гранобластовой и гетеробластовой структуры, массивной и полосчатой текстуры; 2) известняки скрытокристаллические, мелкозернистые реликтовой органогенной и массивной текстуры; 3) углистые известняки криптокристаллической или пелитоморфной структуры; 4) доломиты мелкозернистые гранобластовой структуры (доломит 10–90%); 5) известняки алевролитистые; 6) песчаники полимиктовые с карбонатным цементом базального типа. Все карбонатные породы при раскалывании издают запах сероводорода.

Каморзинская толща представлена черными битуминозными известняками с запахом



8 – Neplyuevsky gabbro-granodiorite-granite complex; 9 – Kamensky rock sequence (carbonaceous-argillaceous-calcareous); 10 – Bredinsky formation (sandstones, siltstones, argillaceous and carbonaceous-argillaceous shales); 11 – Aydyrlinsky basalt-latite-trachydacite complex; 12 – Rymniksky formation; 13 – Chulaksaisky formation (carbonaceous metasandstones); 14 – Kusakansky rock sequence (biotite gneiss, amphibole-biotite with amphibolite interlayers); 15 – Metasomatites (gr' – greisenization, br' – bere-sitization, listvenitization, q'Fe' – silicification, ferruginization); 16 – mafic rocks; 17 – facies of metamorphism (a – greenschist, б – epidote-amphibolite); 18 – geological boundaries (a – reliable, б – discordant occurrence reliable, в – facies); 19 – Fractures (a – unidentified kinematics, б – thrusts); 20 – elements of occurrence (a – inclined occurrence of layering, б – inclined occurrence of schistosity, в – vertical occurrence of schistosity, г – inclined occurrence of metamorphic banding and gneissic character, д – horizontal occurrence of mineral lineation). Rectangles with numbers – research areas (1 – Suunduk, 2 – Kamenka).

сероводорода, содержащими перекристаллизованные членики криноидей, а также телами окварцованных крупнозернистых мраморов линзовидной формы с зонами тектонических брекчий. Породы толщи не несут признаков стратификации. Выделены несколько типов карбонатных пород: 1) мраморизованные мелко-среднезернистые известняки и мраморы массивной, неясно-полосчатой текстуры за счет неравномерного распределения тонкодисперсного черного органического вещества; 2) мраморизованные известняки крупнозернистые с гомеобластовой структурой, массивной текстурой без признаков ориентировки зерен. Возраст толщи принят как верхневизейский-серпуховский, основанный на фаунистических остатках (Тевелев и др., 2018).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы для исследований собраны авторами при проведении экспедиционных работ. При исследованиях использованы методы полевой структурной геологии, петрологические, минералогические и геохимические. Содержание петрогенных элементов в 43 образцах пород, отобранных по нескольким профилям, изучалось методами рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометрах CPM-35 и EDX-8000 (аналитики Н.П. Горбунова, Л.А. Татаринова, Г.А. Аввакумова, А.К. Фокина), редких и рассеянных элементов – методом ICP-MS на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000. Анализы выполнены ЦКП “Геоаналитик” Института геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Взаимоотношения карбонатных пород

На участке “Суундук” контакт гранитогнейсов и гнейсов с карбонатными породами скрыт широким слабовыраженным логом юго-западного простирания. На правом борту наблюдаются многочисленные небольшие обнажения гнейсов и редкие крупные обнажения типа “каменных палаток”, гранитов. Гнейсовидность снижается на юго-восток под углом 30–50°. На левом борту лога отмечаются развалы светлых кремневых пород; релик-

тов субстрата не обнаружено. К юго-востоку они быстро, в интервале 10–15 м, сменяются светлыми мелкозернистыми доломитами, местами дезинтегрированными до состояния песчаной фракции. Далее к юго-востоку доломиты сменяются крупнозернистым Mg-кальцитовым мрамором и перемежаются с ним; границы неотчетливые, морфология тел сложная, близка к линзовидной. Еще юго-восточнее появляются темные мраморизованные известняки (рис. 2). Таким образом, в данном пересечении при удалении от гранитогнейсового массива наблюдается следующая последовательность карбонатных пород: 1) мелкозернистые светлые доломиты; 2) Mg-кальцитовый мрамор; 3) темный мраморизованный известняк. Все карбонатные породы грубо рассланцованы, при раскалывании издают запах H₂S; взаимоотношения между ними не ясны.

Наиболее полный и информативный разрез карбонатной толщи наблюдается в скальных обнажениях на левом берегу р. Суундук, от устья р. Каменки до п. Кваркено. Здесь в обнажении 1 (см. рис. 2) в непосредственной близости к гранитогнейсовому массиву отмечаются светлые, массивные, крупнозернистые кальцитовые мраморы с характерной полигональнозернистой структурой, в силу чего легко распадаются на отдельные зерна. Кальцит не деформирован. В южном направлении они прослеживаются на 130–150 м, а затем перекрываются зоной рассланцевания, полого падающей на юг. Мощность зоны 2–3 м. Преобладают Mg-кальцитовые мраморы, содержащие мелкозернистые светло-серые доломиты в виде будин, растащенных в зоне рассланцевания (рис. 3). Форма будин линзовидная, уплощенная в плоскости рассланцевания. Падение сланцеватости по азимуту 190° под углом 10°. Сланцеватость неравномерная и облекает будины. Границы доломитового мрамора в одних случаях резкие, в других постепенные, что указывает на его дедоломитизацию. В доломитах встречаются членики криноидей.

Иногда в будинах наблюдаются субпараллельные залеченные либо зияющие трещины, ориентированные под острым углом к рассланцеванию и падающие по азимуту 40° под углом 40°. В неразстворимом остатке Mg-кальцитового мрамора отмечаются мелкие зерна красного корунда, бесцветного флогопита и флюорита. Несколько юж-

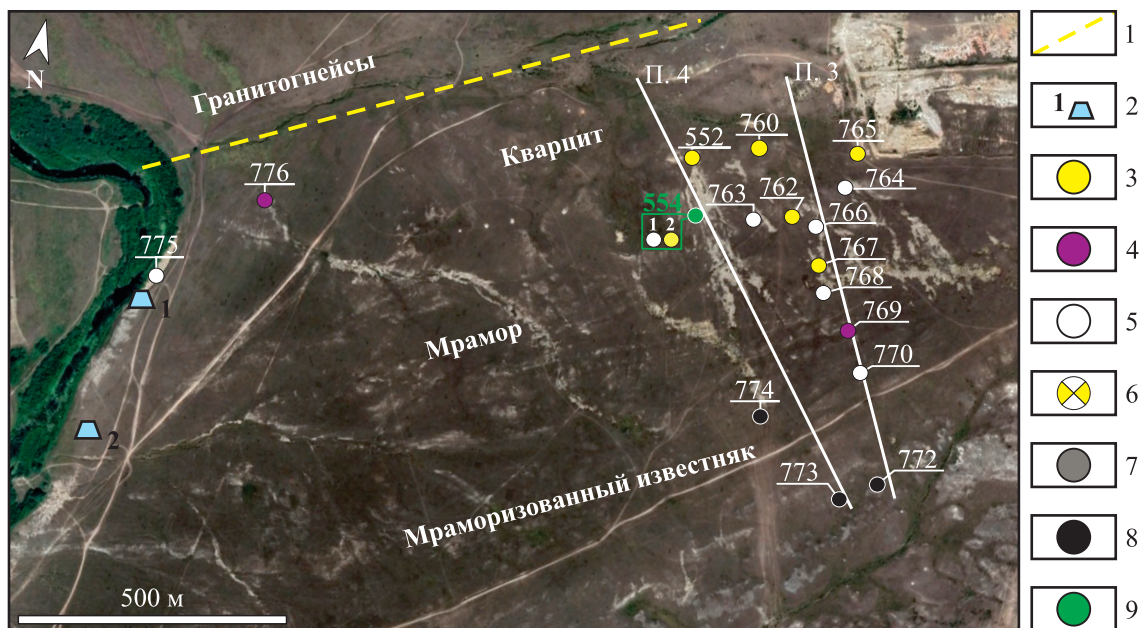


Рис. 2. Участок “Суундук” на космоснимке сервиса Google Earth Pro. Зона контакта карбонатных пород и гранитогайсового массива.

Здесь и на рис. 5: 1 – граница массива; 2 – обнажения мраморов; 3–9 – пробы из скальных обнажений и их номера (3 – доломит, 4 – Mg-кальцитовый мрамор, 5 – кальцитовый мрамор, 6 – доломит-кальцитовый мрамор, 7 – мраморизованный известняк, 8 – мраморизованный известняк с повышенным содержанием Mg ($MgO > 1$ мас. %), 9 – две разновидности мрамора и более в одном обнажении).

Fig. 2. The “Suunduk” research site on the Google Earth Pro satellite image. The contact zone of carbonate rocks and granite-gneiss massif.

Here and in Fig. 5: 1 – the boundary of the massif; 2 – marble outcrops; 3–9 – samples of rock exposures and their numbers (3 – dolomite, 4 – Mg-calcite marble, 5 – calcite marble, 6 – dolomite-calcite marble, 7 – marmorized limestone, 8 – marmorized limestone with a high Mg content ($MgO > 1$ wt %), 9 – two or more varieties of marble in one outcrop).

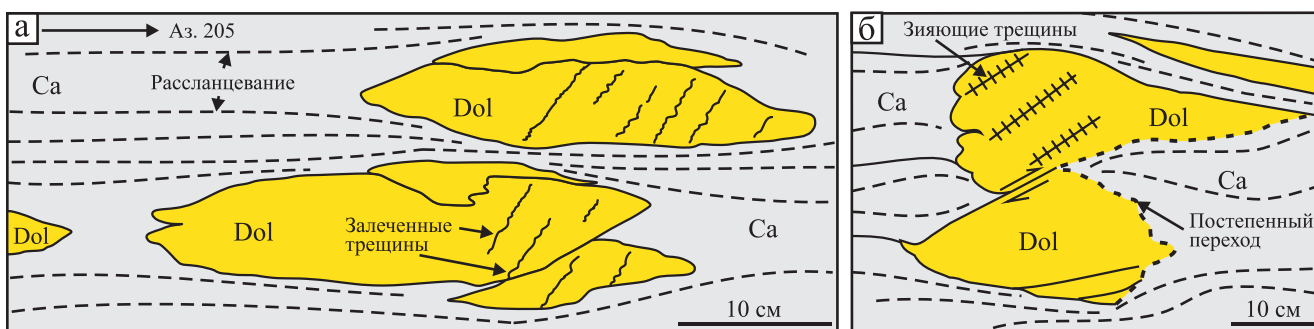


Рис. 3. Будины доломита (Dol) в рассланцованном Mg-кальцитовом мраморе (Ca) в обнажении 1 на рис. 2.

Fig. 3. Dolomite boudines (Dol) in schistose Mg-calcite marble (Ca) in outcrop 1 in Fig. 2.

нее обнажения 1 в Mg-кальцитовом мраморе обнаружен редкий минерал – мухинит (Томилина и др., 2016).

Выше зоны рассланцевания наблюдаются массивные мелкозернистые светло-серые или желтоватые доломиты с фаунистическими остатками криноидей. Видимая мощность в обнажении около 5 м.

К югу от доломитов мраморы в обнажении 2 (см. рис. 2) наблюдаются в виде низких узких гряд северо-восточного простирания. Преобладают светлые Mg-кальцитовые и кальцитовые мраморы, реже темно-серые мраморизованные известняки. Полосчатость наложенная, кристаллизационная, на что указывает обнаружение в кальцитовом

мраморе двух будин гранитных пегматитов: одна 10×15 см овальной формы, с каймой из зеленых минералов, вторая – около 1.0×1.5 м, без реакционной каймы (рис. 4). Пегматит состоит из блоков желтоватого полевого шпата (ортоклаза) размером до 10–15 см и серого кварца. Местами наблюдается симплектитовая структура “письменного гранита”.

Присутствие в доломитах фауны криноидей, распространенной в мраморизованных известняках этой же толщи, указывает на проявление раннего (дометаморфического) Mg-метасоматоза известняков: фаунистические остатки выполнены монокристаллическим кальцитом без признаков деформации и рекристаллизации. Аналогичная ситуация описана в Кочкарском антиклинории (Кисин, 2007; Кисин, Коротеев, 2017).

На участке “Каменка” полоса мраморов и темных битуминозных известняков с раннекаменноугольной фауной, суммарной шириной более 300–400 м, прослеживается от п. Кировский в северо-западном направлении на несколько километров (рис. 5). К востоку от п. Кировский имеется крупный лог с азимутом простирания 239° , пересекающий мраморы вкрест простирания. Контакт мрамора с гнейсовосланцевой толщей скрыт корами выветривания и карстовыми отложениями. Карбонатная порода в зоне контакта представлена плотными белыми среднезернистыми Mg-кальцитовыми и доломит-кальцитовыми мраморами. Среди акцессорных минералов в мраморе отмечены красный корунд (рубин), флогопит, Sr-содержащий мусковит, графит, флюорит, зеленый турмалин, пирит и пирротин. Мраморы слабо рассланцованы субконформно контакту с гнейсово-сланцевой толщей. Ширина зоны рубиноносных мраморов составляет



Рис. 4. Контакт будины пегматита с мрамором (Ca) в левом борту долины р. Суундук.

Fig. 4. Contact of pegmatite buodin with marble (Ca) on the left valley side of the Suunduk river.

около 150 м. Далее к юго-западу в интервале около 200 м обнажаются преимущественно средне-крупнозернистые кальцитовые мраморы, которые сменяются зоной чередования мраморов и темных мраморизованных известняков с визейской фауной. Ширина зоны составляет 200–250 м. Далее к юго-западу наблюдаются только темные мраморизованные известняки. Плоскостные элементы падают на юго-запад и закономерно возрастают от 15° в кристаллических сланцах до $50\text{--}60^\circ$ в известняках.

Карбонатная толща по простиранию рассекается долиной р. Каменки, которая в интервале около 1 км к северо-западу от п. Кировский следует по почти прямолинейному рву в мраморизованных



Рис. 5. Участок “Каменка” на космоснимке сервиса Google Earth Pro.

Fig. 5. The “Kamenka” research site on the Google Earth Pro satellite image.



Рис. 6. Тектоническая зона, зафиксированная долиной р. Каменки (штриховая линия – борты зоны).

Fig. 6. The tectonic zone reflected by the valley of the Kamenka river (dotted line – sides of the zone).

известняках (рис. 6). Ширина рва до 30 м, а высота бортов 3–4 м. Тектоническая природа данного рва однозначно определяется стилем деформации пород противоположных бортов, а также степенью тектонической переработки пород в его пределах. В северной части ров не занят долиной реки и доступен для исследований. Здесь он представлен депрессией глубиной до 3 м при ширине около 10 м. Азимут простираения рва 140° ЮВ. В днище обнажаются мелкозернистые белые сахаровидные доломит-кальцитовые мраморы с мелкоплитчатой (2–5 см толщиной) отдельностью того же простираения и падающей на юго-запад под углом $37\text{--}47^{\circ}$. На препарированной ветрами и дождями поверхности мрамора просматриваются многочисленные частично залеченные трещины нескольких систем. Акцессорные минералы представлены пиритом, флогопитом, зеленым турмалином и недеформированными кристалликами графита.

В лежащем (восточном) боку тектонической зоны залегают темные мраморизованные известняки с тонкоплитчатой отдельностью (аз. пад. 230° , угол пад. 37°). Толщина плиток 10–20 мм. Данная отдельность больше всего отвечает кливажу сланцеватости. По трещинам кливажа иногда наблюдаются крупные сноповидные агрегаты тремолита, частично замещенного тальком. В известняке распространены деформированные фаунистические остатки, выполненные белым кальцитом. Основ-

ная масса породы представлена сильно уплощенными зернами серого кальцита (с углеродистым веществом?). Местами известняки секутся вкрест расщепления короткими трещинами, вдоль которых известняк замещается светлым мелкозернистым доломитом или двукarbonатным мрамором.

В противоположном, висячем, боку тектонической зоны также находятся темные известняки, но трещины кливажа в них отсутствуют, за исключением редких выдержанных по простираению трещин, делающих породу толстоплитчатой. В интервале 2–3 м от тектонической зоны известняки разбиты многочисленными крутопадающими трещинами на блоки сильно уплощенной клиновидной (ромбовидной) формы. Известняки висячего бока непосредственно с доломит-кальцитовым мрамором на данном участке не контактируют и разделены зоной белого массивного крупнозернистого кальцитового мрамора мощностью до 0.5 м, реже более (рис. 7а). В данном случае кальцитовый мрамор представлен линзой протяженностью около 3 м при толщине в раздвиге более 1 м. Известняки плавно огибают тело мрамора, который внедрился в виде пластического потока по контакту известняков и доломит-кальцитового мрамора. На отдельных участках в контакте известняка с кальцитовым мрамором наблюдаются брекчии мощностью до 0.5 м, представленные обломками известняков и доломитов. В других случаях в мраморизо-

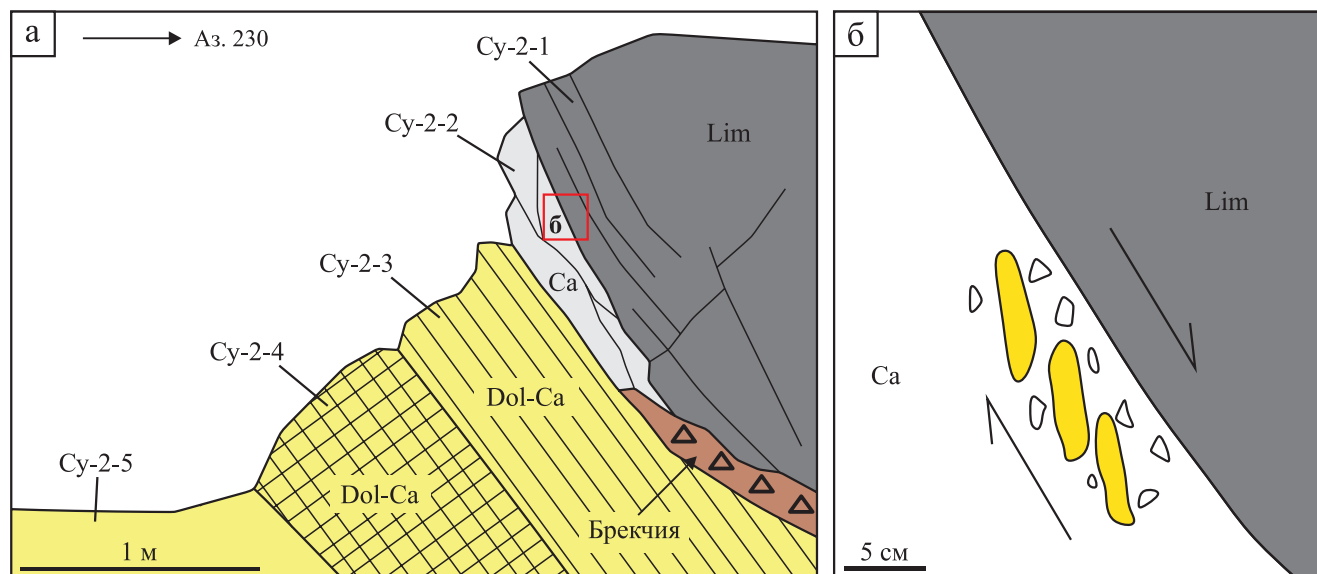


Рис. 7. Зарисовка обнажения в висячем боку тектонической зоны (а); фрагмент рис. а – брекчии в контакте крупнозернистого кальцитового мрамора (Ca) с органогенным мраморизованным известняком (Lim) с ориентированными фрагментами плиток мелкозернистого светлого мрамора (б).

Пробы профиля Су-2: 1 – темный мраморизованный известняк (Lim); 2 – крупнозернистый кальцитовый мрамор (Ca); 3 – мелкозернистый доломит-кальцитовый мрамор (Dol-Ca), тонкоплитчатый; 4 – то же, толстоплитчатый; 5 – то же, трещиноватый.

Fig. 7. Sketch of the outcrop in the hanging wall of the tectonic zone (a); fragment of the Fig. a – breccias in contact of coarse-grained calcite marble (Ca) with organogenic marmorized limestone (Lim), with oriented fragments of slabs of fine-grained light-colored marble (b).

Cy-2 samples: 1 – dark marmorized limestone (Lim); 2 – coarse-grained calcite marble (Ca); 3–5 – fine-grained dolomite-calcite marble (3 – thin-slab, 4 – thick-slab, 5 – fractured).

ванных известняках наблюдаются трещины скалывания с признаками выдвигания вверх пород лежащего бока (рис. 8а), т. е. указывают на подъем кальцитового мрамора. В лежащем боку тела кальцитового мрамора иногда отмечается брекчия доломит-кальцитового и кальцитового мрамора с признаками перекристаллизации. Двугарбонатный мрамор вблизи кальцитового мрамора тонкоплитчатый и так же несет признаки перекристаллизации.

Двугарбонатный мрамор содержит реликты темных мраморизованных известняков (см. рис. 8б), с которыми имеет плавные переходы как вкрест простирания, так и по простиранию. В данном случае мы вновь видим результат синтетектонического магнезиального метасоматоза.

В непосредственной близости от описанной тектонической зоны, к востоку темные мраморизованные известняки вмещают несколько штоков крупнозернистого светлого кальцитового мрамора. Наиболее крупный из них имеет размеры 30×11 м, вытянут согласно простиранию пород. В западном контакте хорошо видны взаимоотношения между органогенным мраморизованным известняком и мрамором (рис. 9а). Контакт резкий, ровный, с редкими мелкими уступами; азимут падения 220° ,

угол падения 50° . В известняке наблюдаются признаки течения (деформации фаунистических остатков, появление мелких ориентированных линз белого кальцита, сильное ориентированное удлинение зерен кальцита в породе). Мрамор массивный. Поверхность контакта осложняется наплывами, по рисунку напоминающими рыбу чешую, обращенную выпуклостями вверх. Также распространены мелкие линзовидные зияющие трещины растяжения, ориентированные субгоризонтально. В мраморе наблюдается будинированная жила молочно-белого кварца (рис. 9б). Форма обломков угловатая.

Особенности химического состава карбонатных пород

Для изучения химического состава и геохимических особенностей карбонатных пород в обрамлении Суундукского массива с обоих участков отобраны пробы по профилям вкрест простирания пород (см. рис. 2, 5). Химический состав пород приведен в табл. 1. Во всех пробах содержания Na_2O , K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 , V, Cr, Fe_2O_3 ниже предела обнаружения данным методом (только в одной

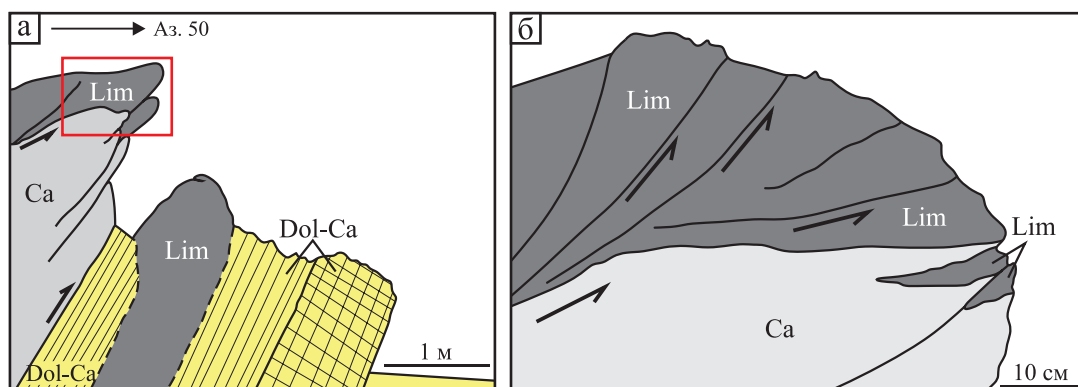


Рис. 8. Характер взаимоотношений мраморизованного известняка (Lim) с кальцитовым (Ca) и доломит-кальцитовым (Dol-Ca) мрамором в висячем боку тектонической зоны (а) и фрагмент деталей контакта (б).

Fig 8. The character of the relationship of marmorized limestone (Lim) with calcite (Ca) and dolomite-calcite (Dol) marble in the hanging wall of the tectonic zone (a) and a fragment of contact details (б).

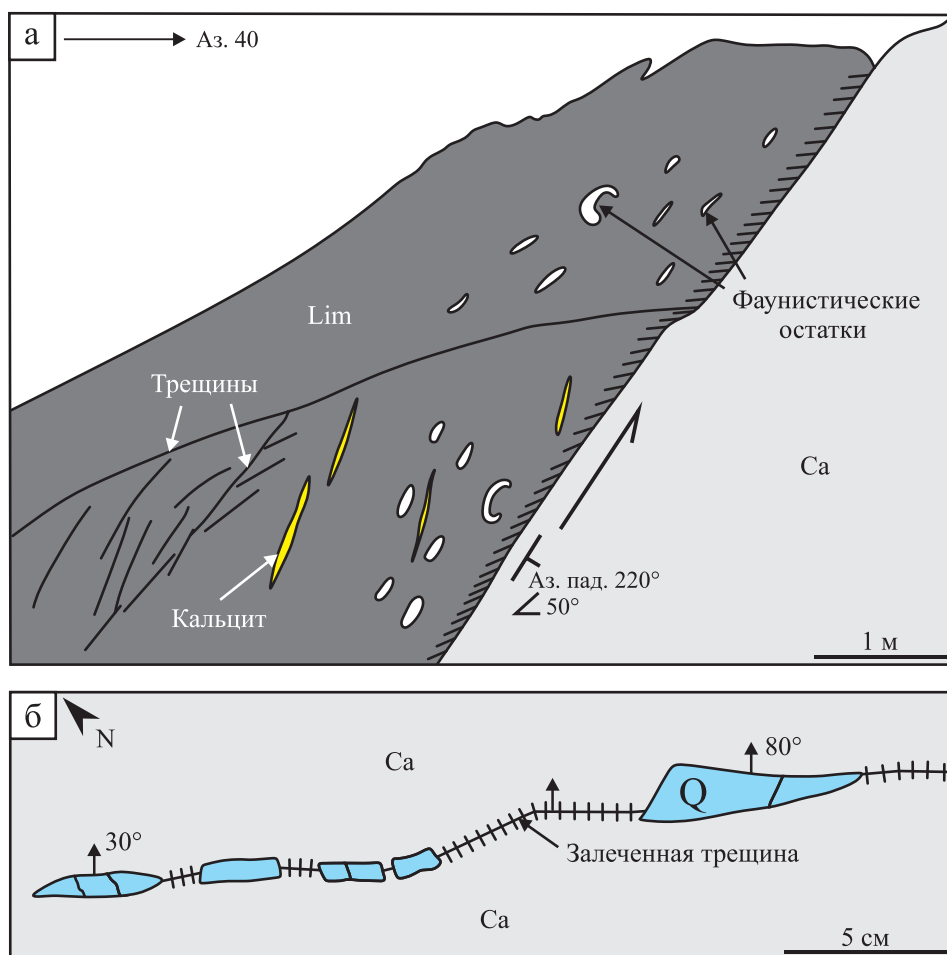


Рис. 9. Контакт штока 30×10 м крупнозернистого кальцитового мрамора (Ca) с органогенными мраморизованными известняками (Lim) лежащего бока тектонической зоны (а), с бугинированной жилой молочно-белого кварца (Q) в крупнозернистом светлом мраморе (б).

Fig. 9. Contact of a 30×10 m stock of coarse-grained calcite marble (Ca) with organogenic marmorized limestones (Lim) of the footwall of the tectonic zone (a), with a boudinated vein of milk-white quartz (Q) in coarse-grained light-colored marble (б).

Таблица 1. Химический состав карбонатных пород метаморфического обрамления Суундукского массива, мас. %

Table 1. Chemical composition of carbonate rocks of the Suunduk massif, wt %

№ п/п	№ обр.	MgO	P ₂ O ₅	S	CaO	TiO ₂	MnO	П.л.п.	Сумма	Координаты точек	Порода
Профиль 1 (Каменка)											
1	778	0.53	Н. о.	Н. о.	55.07	0.02	Н. о.	44.15	99.91	52°10'3.03"C	Lim
2	777	21.78	Н. о.	Н. о.	31.07	Н. о.	0.03	46.92	99.90	52°10'2.96"C	Dol
3	779	1.24	Н. о.	Н. о.	53.89	0.01	Н. о.	44.44	99.73	52°10'6.33"C	Mg-Cal
4	780	22.03	Н. о.	Н. о.	30.57	0.01	0.03	46.95	99.69	52°10'6.91"C	Dol
5	781	7.15	Н. о.	Н. о.	47.94	Н. о.	0.02	44.23	99.76	52°10'6.96"C	Dol-Cal
6	782	21.76	Н. о.	Н. о.	31.60	Н. о.	0.03	46.46	99.98	52°10'8.46"C	Dol
7	783	0.63	0.03	0.04	55.53	0.01	Н. о.	43.24	99.65	52°10'8.80"C	Cal
8	784	0.38	0.03	0.02	55.43	0.01	0	43.78	99.81	52°10'11.95"C	Cal
9	785	0.45	Н. о.	Н. о.	55.88	0.01	Н. о.	43.07	99.69	52°10'15.49"C	Cal
Профиль 2 (Каменка)											
10	558	0.62	Н. о.	Н. о.	55.23	0.01	Н. о.	43.90	99.98	52°10'12.32"C	Lim
11	559	0.62	Н. о.	Н. о.	55.05	Н. о.	Н. о.	44.10	99.95	52°10'13.04"C	Lim
12	560	0.72	Н. о.	Н. о.	54.66	Н. о.	Н. о.	44.18	99.75	52°10'13.39"C	Lim
13	561-1	0.4	Н. о.	Н. о.	55.48	0.03	Н. о.	43.83	99.98	52°10'14.34"C	Lim
14	561-2	0.9	Н. о.	0.03	54.72	0.03	Н. о.	43.82	99.70		Cal
15	561-3	9.29	Н. о.	Н. о.	45.39	0.02	Н. о.	44.91	99.78		Dol-Cal
16	561-4	9.37	Н. о.	Н. о.	45.02	0.03	Н. о.	45.12	99.71		Dol-Cal
17	561-5	0.52	Н. о.	Н. о.	55.08	Н. о.	Н. о.	44.09	99.91		Cal
18	562-1	20.48	Н. о.	Н. о.	32.51	0.015	Н. о.	46.63	99.75	52°10'14.22"C	Dol
19	562-2	2.13	Н. о.	Н. о.	53.45	0.021	Н. о.	43.69	99.53		Mg-Lim
20	563	3.43	Н. о.	Н. о.	52.64	0.026	Н. о.	43.33	99.65	52°10'14.37"C	Mg-Lim
21	565	0.59	Н. о.	0.03	54.67	0.059	Н. о.	44.27	99.82	52°10'14.77"C	Lim
22	566	0.52	Н. о.	0.02	55.42	0.043	Н. о.	43.53	99.63	52°10'15.10"C	Cal
23	567	0.38	Н. о.	0.03	55.62	0.009	Н. о.	43.43	99.61	52°10'15.99"C	Cal
24	568	0.43	Н. о.	Н. о.	55.9	0.012	Н. о.	43.65	99.85	52°10'18.87"C	Cal
25	570	0.35	Н. о.	0.03	55.69	0.22	Н. о.	43.23	99.66	52°10'20.28"C	Cal
Профиль 3 (Суундук)											
26	772	3.99	Н. о.	Н. о.	52.55	Н. о.	0	42.83	99.62	52°6'13.63"C	Mg-Lim
27	770	0.99	Н. о.	Н. о.	55.07	0.01	0	43.46	99.67	52°6'20.11"C	Cal
28	769	1.46	Н. о.	Н. о.	54.42	0	Н. о.	43.72	99.69	52°6'22.49"C	Mg-Cal
29	768	0.60	Н. о.	Н. о.	55.68	0.03	Н. о.	43.43	99.85	52°6'24.48"C	Cal
30	767	22.03	Н. о.	Н. о.	31.07	0	Н. о.	46.61	99.87	52°6'26.06"C	Dol
31	766	1.08	Н. о.	0.03	55.31	Н. о.	Н. о.	43.31	99.81	52°6'28.48"C	Cal
32	762	22.10	Н. о.	Н. о.	30.67	0	0.03	47.02	99.94	52°6'28.76"C	Dol
33	764	0.74	Н. о.	0.02	55.60	0.03	Н. о.	43.10	99.59	52°6'31.19"C	Cal
34	765	20.76	0.03	Н. о.	32.09	Н. о.	0.04	46.80	99.88	52°6'33.44"C	Dol
35	760	22.59	0.04	Н. о.	30.18	Н. о.	0.03	46.98	99.93	52°6'32.54"C	Dol

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

№ п/п	№ обр.	MgO	P ₂ O ₅	S	CaO	TiO ₂	MnO	П.п.п.	Сумма	Координаты точек			Порода
Профиль 4 (Суундук)													
36	773	1.04	Н. о.	Н. о.	55.34	0.03	Н. о.	43.22	99.77	52°6'12.25"C	59°45'38.43"B	Mg-Lim	
37	774	1.32	Н. о.	Н. о.	54.71	0	Н. о.	43.77	99.94	52°6'16.39"C	59°45'29.02"B	Mg-Lim	
38	763	0.90	Н. о.	0.02	55.61	0.01	Н. о.	43.24	99.87	52°6'28.14"C	59°45'24.56"B	Cal	
39	554-1	1.08	Н. о.	Н. о.	54.95	0.02	Н. о.	43.54	99.78	52°6'27.67"C	59°45'18.77"B	Cal	
40	554-2	22.89	Н. о.	Н. о.	30.34	0.01	Н. о.	46.53	99.96			Dol	
41	552	22.77	0.04	Н. о.	30.44	0	0.04	46.57	99.96	52°6'31.12"C	59°45'17.27"B	Dol	
Точки вне профиля (Суундук)													
42	775	1.04	Н. о.	0.02	54.86	0.01	Н. о.	43.90	99.94	52°6'17.11"C	59°44'26.61"B	Cal	
43	776	2.66	Н. о.	Н. о.	53.85	0.02	Н. о.	42.98	99.66	52°6'23.09"C	59°44'35.77"B	Mg-Cal	
Пределы определения		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	K ₂ O	TiO ₂	V	Cr	MnO	Fe ₂ O ₃ общ
		0.15	0.32	0.16	0.22	0.03	0.02	0.04	0.005	0.003	0.003	0.02	0.06

Примечание. Lim – мраморизованный известняк (MgO < 1 мас. %); Mg-Lim – Mg-известняк мраморизованный (MgO > 1); Mg-Cal – магнезиально-кальцитовый мрамор (MgO > 1.1); Dol – доломитовый мрамор (MgO > 20); Cal – кальцитовый мрамор (MgO < 1.1 мас. %); Dol-Cal – доломит-кальцитовый мрамор; Н. о. – не обнаружено.

Note. Lim – marmorized limestone (MgO < 1 wt %); Mg-Lim – Mg-limestone marmorized (MgO > 1); Mg-Cal – magnesia-calcite marble (MgO > 1.1); Dol – dolomite marble (MgO > 20); Cal – calcite marble (MgO < 1.1 wt %); Dol-Cal – dolomite-calcite marble; Н. о. – not detected.

пробе содержание SiO₂ 0.29 мас. %). Содержание MgO в мраморизованных известняках варьирует от 0.4 до 4.0 мас. %, в кальцитовом мраморе – 0.35–1.08, Mg-кальцитовом мраморе – 1.24–2.66, двукарбонатном мраморе – 7.15–9.37, доломитовом мраморе – 20.48–22.89 мас. %. По содержанию MgO кальцитовый и Mg-кальцитовый мрамора несколько отличаются от карбонатных пород Кочкарского антиклинория в сторону увеличения (см. ранее), но, возможно, это обусловлено различными методами анализа (“мокрая химия” и РФА). В целом зональность карбонатных пород по петрологическим типам в обрамлении гранитогнейсового массива не выявлена, если не считать мраморизованные известняки, наиболее удаленные от массива.

Геохимические особенности карбонатных пород обрамления отражены на рис. 10–14. Нормирование выполнено по среднему содержанию элементов в пробах органогенных мраморизованных известняков, максимально удаленных от гранитогнейсового массива (пробы 777, 558, 559, 560), поскольку эти известняки послужили субстратом для всех описанных мраморов. Данные известняки претерпели диагенетические преобразования, региональный метаморфизм низких ступеней, возможно, незначительные гидротермально-метасоматические изменения.

На участке “Суундук” вблизи контакта отмечаются слабое обогащение Cs, Mn, As, Ta, Sn, Ag и обеднение Sr, Mo, V, Cr, Co, Ni, Tl. На участке “Каменка”: (профиль 1) наблюдаются обогащение Li, Be, Cs, Rb, Tl, Sn, Th и обеднение Bi; (профиль 2) обогащение Cs, Rb, Cr, обеднение Tl, V, Sn, Pb. Тектоническая зона на участке “Каменка”: обогащена Li, Cs, Rb, Mo, Zn, Y, Sc, Zr, обеднена Tl и V. В целом можно отметить слабую обогащенность зоны контакта литофильными элементами. Распределение всех этих химических элементов по профилям неравномерное, скачкообразное.

На профиле 1 участка “Каменка” вблизи гранитогнейсового массива распространен крупнозернистый кальцитовый мрамор, который к ЮЗ сменяется другими мраморами. Проба 777 взята непосредственно в контакте доломита с темным мраморизованным известняком. Как видно на рис. 10 (слева), наблюдается слабое доминирование легких РЗЭ над тяжелыми. Кальцитовый и доломитовый мраморы показывают отчетливую положительную аномалию по Се и отрицательную – по Eu. Отклонения от эталонного известняка в ту или иную сторону незначительные. На правом рисунке отражены незначительные колебания содержаний РЗЭ, которые не контролируются типами карбонатных пород или расстоянием до массива гранитоидов.

На профиле 2 участка “Каменка” распределение РЗЭ близко к предыдущему (см. рис. 11, слева). Положительная аномалия Се характерна для некоторых типов мрамора, но для других она отсутству-

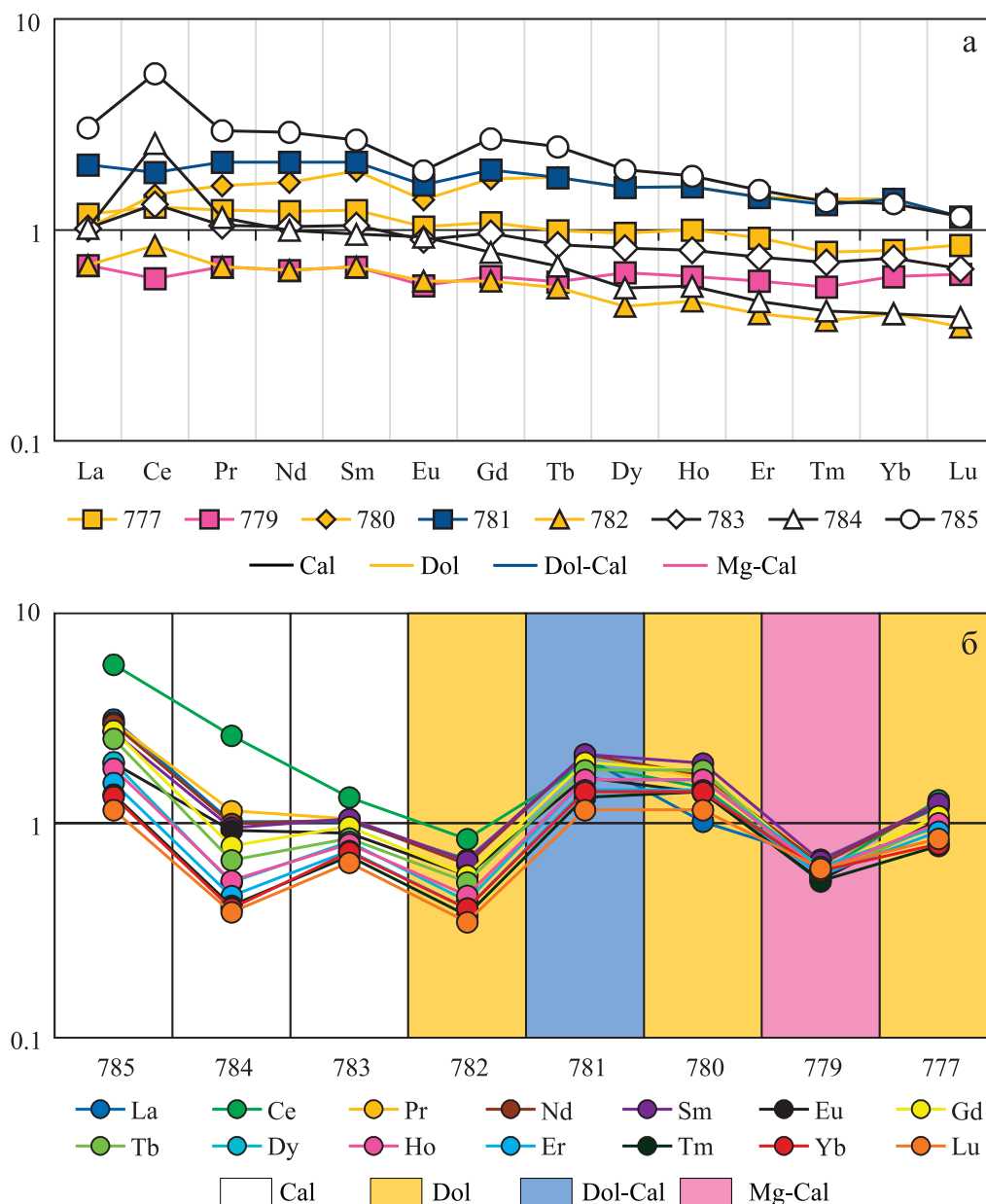


Рис. 10. Распределение РЗЭ в карбонатных породах различных типов участка “Каменка” по профилю 1.

Здесь и на рис. 11–13 нормировано на мраморизованные известняки в профиле, максимально удаленные от гранитогнейсового массива.

Здесь и на рис. 11, 13: а – элементы по пробам; б – в пробах по профилю. Здесь и далее сокращения типов пород приведены в табл. 1.

Fig. 10. Distribution of REE in various types of carbonate rocks of the site “Kamenka” on profile 1.

Here and in Fig. 11–13: it is normalized for marbled limestones in the profile, as far as possible from the granite gneiss massif.

Here and in Fig. 11, 13: a – distribution of elements by samples; б – distribution in samples by profile. Hereafter abbreviations of rock types are given in Table 1.

ет. Eu минимум наблюдается на всех типах мрамора за исключением мраморизованных известняков лежачего бока тектонической зоны (пробы 562-2 и 563), в которых наблюдается положительная европиевая аномалия. На правом рисунке обращает на себя внимание повышенное содержание РЗЭ в дву-

карбонатных, доломитовых и кальцитовых мраморах тектонической зоны (пробы серии 561). Привнос РЗЭ в зону тектонического нарушения мы объясняем проявлением здесь гидротермально-метасоматических процессов, на что указывает также присутствие в нерастворимом остатке проб фло-

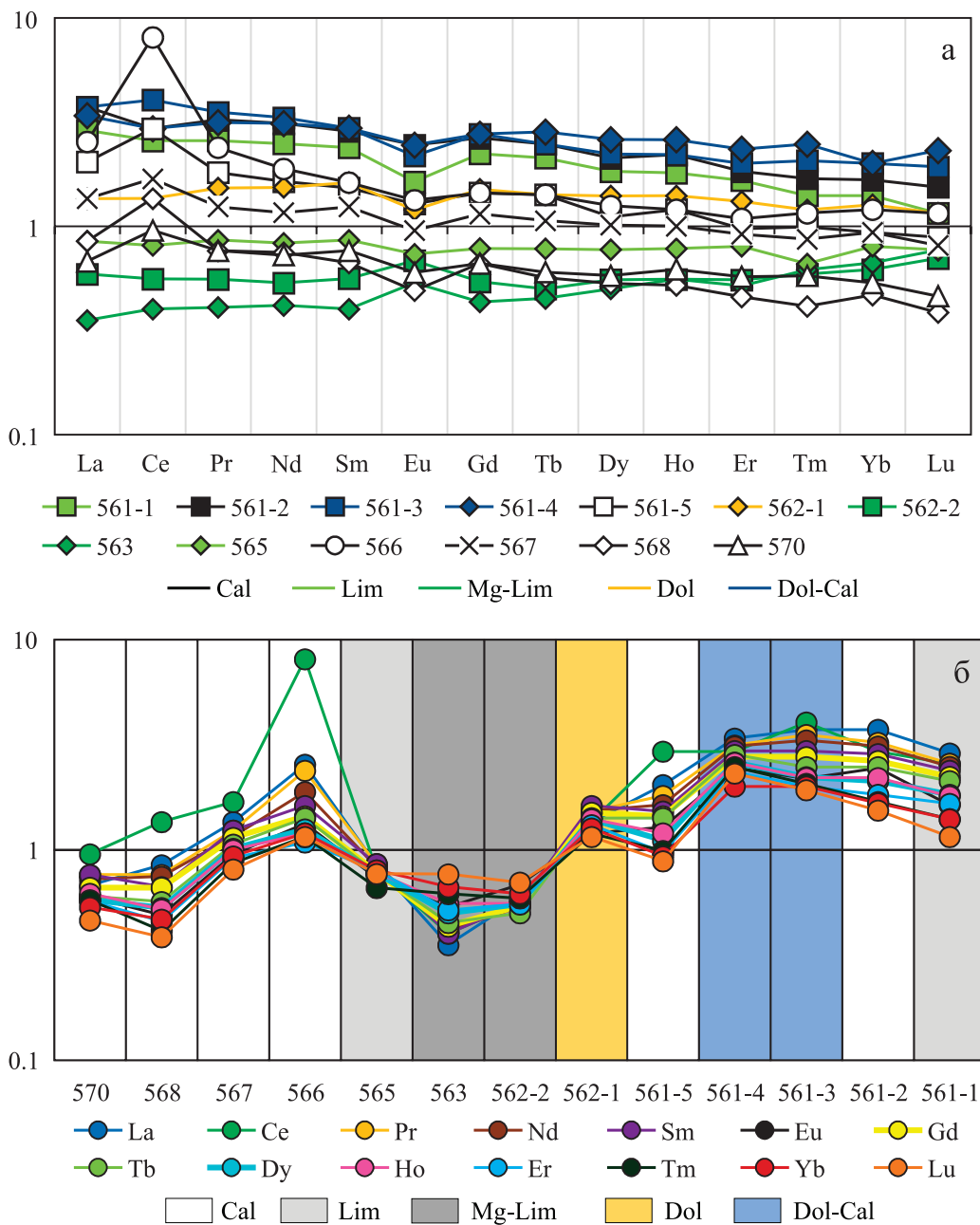


Рис. 11. Распределение РЗЭ в карбонатных породах участка "Каменка" по профилю 2.

Fig. 11. Distribution of REE in carbonate rocks of the site "Kamenka" on profile 2.

гопита, Сг-содержащего мусковита, зеленого турмалина и графита.

В всячем боку тектонической зоны на участке "Каменка" было отобрано еще несколько проб (см. рис. 7а). Распределение РЗЭ в пробах по этому профилю показано на рис. 12.

Мраморизованный известняк в всячем контакте тектонической зоны изменений в содержании РЗЭ не претерпел. Кальцитовый и доломит-кальцитовый мраморы по отношению к известня-

ку обогащены РЗЭ, особенно легкими с появлением в них положительной аномалии Се. В пробе Су-2-5 из осевой части тектонической зоны, напротив, проявлена отрицательная аномалия Се, что, возможно, связано с неполной мраморизацией известняка, реликты которого иногда здесь наблюдаются.

На участке "Суундук" принципиальных отличий в распределении РЗЭ в карбонатных породах также не выявлено (см. рис. 13).

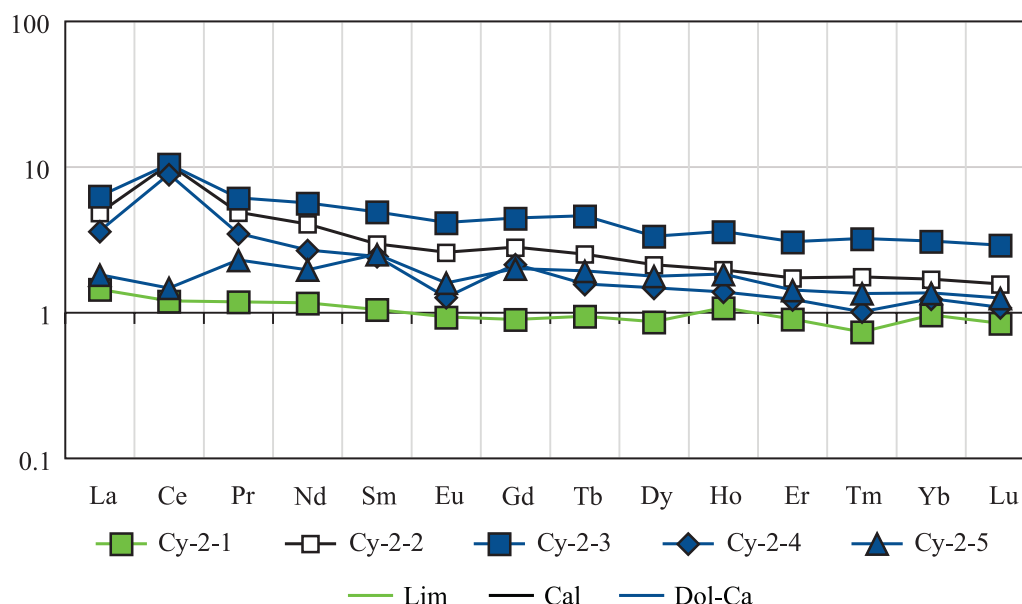


Рис. 12. Распределения РЗЭ в висячем боку тектонической зоны на участке “Каменка” (см. рис. 7а).

Fig. 12. Distribution of REE in the hanging wall of the tectonic zone in the site “Kamenka” (see Fig. 7a).

ОБСУЖДЕНИЕ

Против ожидания, зональность в карбонатном обрамлении южной части Суундукского массива не выявлена ни в петрологических типах мраморов, ни в геохимических особенностях. Только на удалении от массива карбонатные породы представлены исключительно мраморизованными органогенными известняками, что отражает метаморфическую зональность. Как показали результаты исследований взаимоотношений между различными петрографическими разновидностями карбонатных пород метаморфического обрамления южной части Суундукского гранитогнейсового массива, данные известняки послужили для них субстратом.

Наиболее ранними из мраморов являются доломиты, поскольку иногда содержат фаунистические остатки хорошей сохранности, и реликты мраморизованных органогенных известняков. Здесь имеются все признаки метасоматических доломитов, выделенные Н.М. Страховым (1956): реликты фауны, аналогичной той, что наблюдается и в известняках, значительные вариации в содержании Mg, сложная морфология тел, включая жильные, секущие полосчатость пород. Эти доломиты встречаются как в поле мраморизованных известняков, где иногда сопровождаются тремолитом, так и в поле развития кальцитового мрамора, где могут содержать паргасит (более высокотемпературный амфибол). Следовательно, можно утверждать, что на раннем прогрессивном этапе регионального метаморфизма имел место Mg-метасоматоз, контролируемый ослабленными (проницаемыми) зонами в известня-

ках. Только в этом случае могли сохраниться фаунистические остатки в доломите. Аналогичные доломиты с раннекаменноугольной фауной ранее были установлены в Кочкарском антиклинории в мраморизованных известняках и в виде реликтов в крупнозернистом кальцитовом мраморе; здесь в них отмечены жилы Mg-кальцита с красным корундом, фукситом и сфалеритом (Кисин, 2007; Кисин, Коротеев, 2017; Кисин и др., 2022). Образование этих метасоматических доломитов также отнесено к раннему прогрессивному этапу метаморфизма.

Кальцитовый мрамор формировался позднее доломитового. Это следует из фактов наличия будин и реликтов доломита в переходной зоне к массивным доломитам (зоне расланцевания Mg-кальцитового мрамора), постепенных переходов от доломитовых пород к кальцитовым. Кальцитовый мрамор крупнозернистый, массивный; кальцит, как правило, не деформирован. На участке “Каменка” имеется много признаков реоморфического внедрения кальцитового мрамора в другие карбонатные породы (см. рис. 7–9). Реоморфические перемещения мраморов происходит в условиях стрессовых напряжений, которые характерны для прогрессивного этапа динамотермального метаморфизма. О крупных реоморфических перемещениях среднепалеозойских карбонатных пород на Таймыре сообщает А.Г. Жабин (1971), здесь диапировые “клинья” карбонатных пород прорывают терригенно-вулканогенные отложения перми и нижнего триаса; при этом амплитуда перемещения диапиров оценивается в 5–6 км. В Суундукском антиклинории реоморфические перемещения кальцитового мрамора не столь мас-

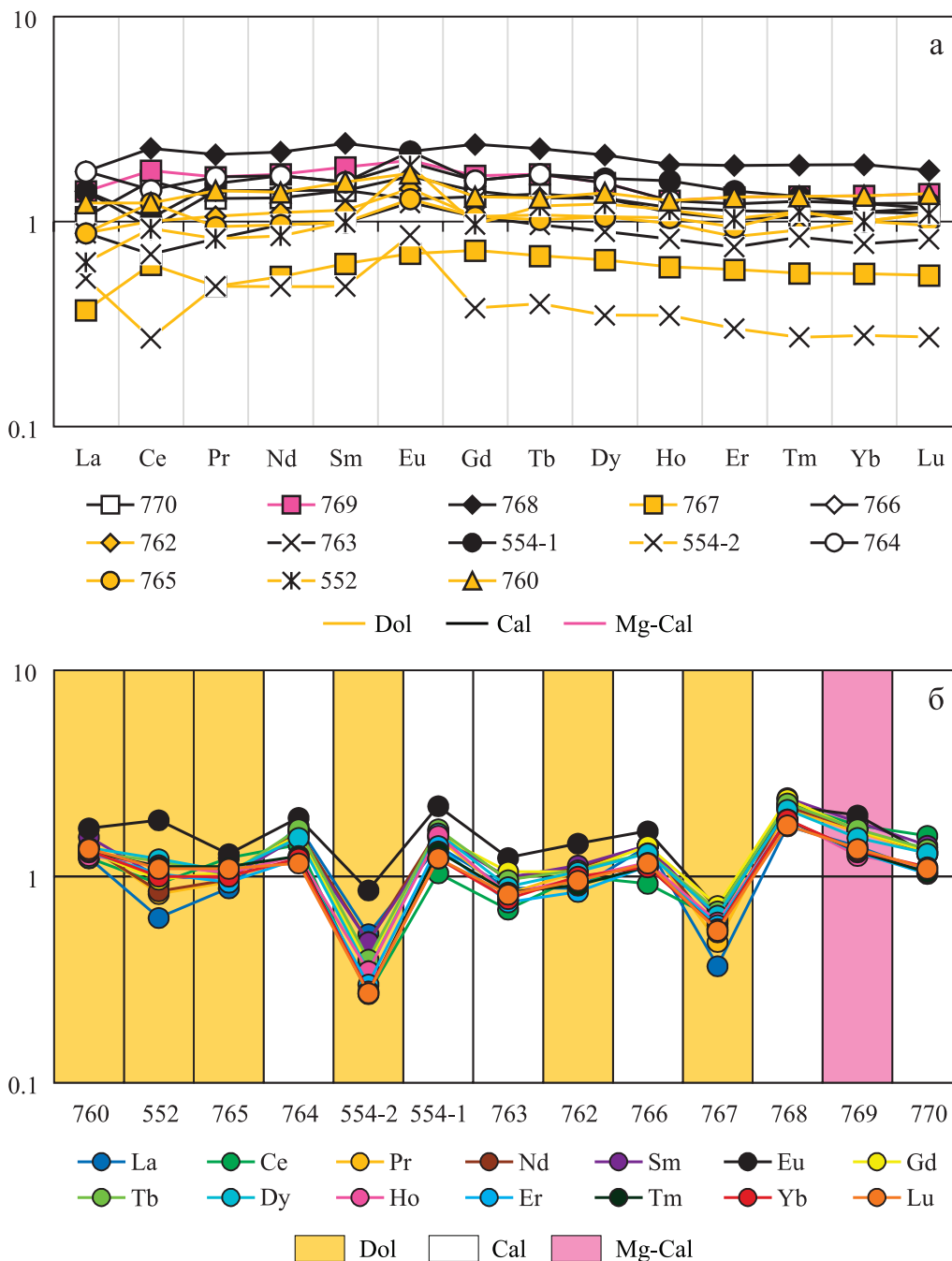


Рис. 13. Распределение РЗЭ в карбонатных породах участка “Суундук” по обобщенному профилю.

Fig. 13. Distribution of REE in carbonate rocks of the site “Suunduk” on the generalized profile.

штабные и, вероятно, не превышают первые метры или десятки метров.

Пластичность кальцитового мрамора несколько выше таковой доломитового и Mg-кальцитового мрамора. Следовательно, в условиях стрессовых напряжений карбонатная толща метаморфического обрамления гранитогнейсового массива полностью отвечает понятию “структурированная геологическая среда”, предложенного В.Г. Талицким

(1991, 1998, 2002), и деформируется согласно вязкостной инверсии Е.И. Паталахи (1971). Наиболее пластичные в этих условиях породы, здесь кальцитовый мрамор, отжимаются из зоны стресса в направлении падения всестороннего давления, т. е. вверх, по зонам трещиноватости и межслоевым границам при их наклонном или вертикальном залегании. Повышенные температуры и флюидонасыщенность способствуют пластичности мрамора.

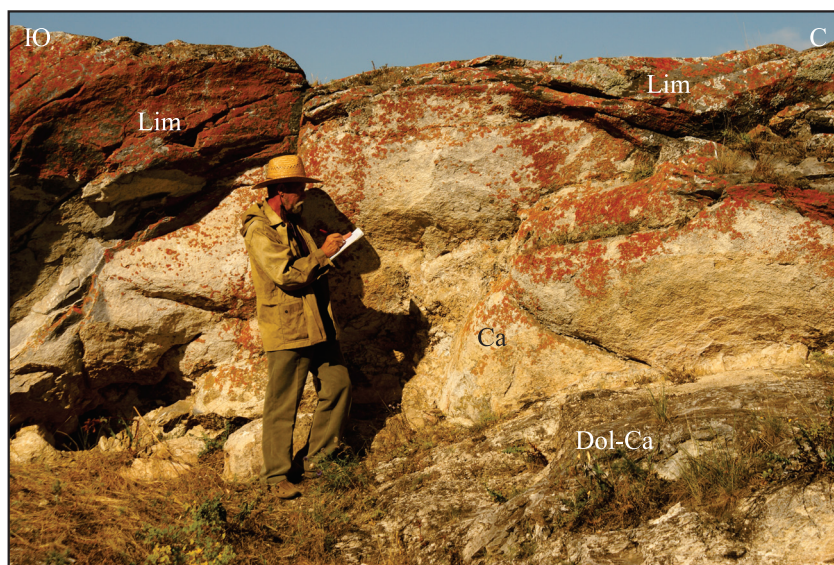


Рис. 14. Линзовидное тело кальцитового мрамора (Ca) на границе мраморизованных известняков (Lim) и доломит-кальцитового мрамора (Dol-Ca) висячего бока тектонической зоны (см. рис. 6).

Fig. 14. Lenticular body of calcite marble (Ca) on the boundary of marmorized limestones (Lim) and dolomite-calcite marble (Dol-Ca) of the hanging wall of the tectonic zone (see Fig. 6).

На пластичное перемещение кальцитового мрамора указывают расщепление и изгибание слоистости в мраморизованных известняках (см. рис. 14). Единичные будины пегматита на участке “Суундук” также указывают на пластичные деформации кальцитового мрамора. В какой-то степени это перекликается с “мраморным меланжем” В.С. Федоровского с соавторами (1993) и Е.В. Скларова с соавторами (2021), отличаясь прежде всего насыщенностью ксеногенным материалом; но механизм формирования, вероятно, схожий.

Итак, механохимическое перемещение кальцитовых мраморов вверх могло осуществиться только в условиях стрессовых напряжений, которые, в свою очередь, могли быть обусловлены формированием гранитогнейсового куполовидного массива, служившего центром динамотермального зонального метаморфизма. Такая связь признается многими исследователями (Летников и др., 2000; Скларов и др., 2021; и др.). Градиенты стрессовых напряжений в околокупольных структурах могут существенно превышать градиенты литостатических нагрузок (Васильев и др., 1999). В результате пластичного течения крупнозернистые кальцитовые мраморы внедрялись в менее метаморфизованные породы и оказывались в окружении мраморизованных известняков. Отсутствие деформаций зерен кальцита в мраморе с будинами жильного кварца (см. рис. 9б) указывает на их кристаллизацию в условиях тектонического покоя.

Возраст карбонатных пород биргильдинской толщи участка “Суундук” и каморзинской тол-

щи участка “Каменка” раннекаменноугольный (C_1). Следовательно, время стрессовых напряжений (прогрессивный динамотермальный метаморфизм) и мраморизации известняков в Суундукском антиклинории приходится на C_{2-3} , что отвечает коллизии на этапе развития Урала (переход к постколлизии на Южном Урале приходится на границу каменноугольного и пермского периодов). Ранний Mg-метасоматоз должен был иметь место в среднем карбоне (C_2), а процесс раздоломичивания, образование кальцитового и Mg-кальцитового мрамора приходится, вероятно, на поздний карбон (C_3).

Схожая ситуация наблюдается и в Кочкарском антиклинории (Кисин и др., 2022): 1) поздний девон – начало коллизии и заложение глубинного надвига; 2) опускание пород лежащего бока, возникновение мелководного морского бассейна, быстро заполняющегося терригенно-карбонатными отложениями с раннекаменноугольной фауной; на синтетектоническое накопление осадков указывают многочисленные структуры оползней и сейсмиков; 3) локальный Mg-метасоматоз по известнякам (реликты фаунистических остатков и оползневых структур в метасоматических доломитах); 4) метаморфизм терригенно-карбонатных осадков с образованием мраморов; 5) кливажирование (расщепление) мрамора в плоскости надвига, дедоломитизация; 6) снятие стрессовых напряжений и гидротермальное минералообразование по плоскостям кливажа.

Особняком стоят доломит-кальцитовые мраморы, которые приурочены к зоне тектонического

срыва, по кинематике отвечающей сбросу. Они содержат реликты темных мраморизованных известняков, с которыми имеют постепенные переходы в интервале 1–2 см, и сильно кливажированы (плитчатая отдельность). Взаимоотношения доломит-кальцитовых мраморов с кальцитовым и доломитовым неясны. Очевидно, что их образование обусловлено Mg-метасоматозом, время которого оценить сложно. Присутствие в доломит-кальцитовых мраморах кристаллов флогопита и графита указывает на относительно высокотемпературные условия метасоматоза. В Кочкарском антиклинории двукарбонатный мрамор формировался на раннем регрессивном этапе, после снятия стрессовых напряжений (Кисин и др., 2016; Кисин, Коротеев, 2017), он также содержит бесцветный флогопит и графит. Логично предположить, что и в Суундукском антиклинории двукарбонатный мрамор формировался на раннем регрессивном этапе метаморфизма. В таком случае реоморфическое внедрение кальцитового мрамора могло быть при активизации тектонических движений.

Таким образом, отсутствие отчетливой зональности в карбонатном обрамлении массива объясняется временем и условиями образования мраморов различных типов.

ВЫВОДЫ

1. Установлена последовательность развития метаморфических и метасоматических процессов в карбонатном обрамлении южной части Суундукского гранитогнейсового массива. Карбонатные породы представлены кальцитовым, Mg-кальцитовым, доломитовым, кальцит-доломитовым мраморами, а на удалении от контакта с гранитогнейсовым массивом – органогенными мраморизованными известняками (C_1). Субстратом для мраморов явились раннекаменноугольные морские карбонатные и терригенно-карбонатные осадки, с содержанием MgO 1–3 мас. %. На раннем прогрессивном этапе зонального метаморфизма имел место Mg-метасоматоз с образованием мелкозернистых светлых доломитов (содержание MgO до 22 мас. %), иногда с реликтами фаунистических остатков. С увлечением P - T условий метаморфизма происходил процесс дедоломитизации, сопровождающийся рассланцеванием и образованием будинаж-структур. Конечным продуктом дедоломитизации является к/з светлый кальцитовый мрамор (MgO 0.9–1.0 мас. %) полигональнозернистой структуры. На участках движения метаморфогенных флюидов образовался Mg-кальцитовый мрамор с акцессорными флогопитом, зеленым турмалином, флюоритом, пиритом, пирротинном и иногда красным корундом. На раннем регрессивном этапе проявилась вторая волна магнезиального метасоматоза с формированием кальцит-доломитового мрамора.

2. В обрамлении Суундукского массива зональность карбонатных пород не выявлена ни в петрологии мраморов (за исключением мраморизованных известняков, отражающих метаморфическую зональность), ни в распределении РЗЭ. На участке “Суундук” вблизи контакта отмечены слабое обогащение мрамора Cs, Mn, As, Ta, Sn, Ag и обеднение Sr, Mo, V, Cr, Co, Ni, Tl относительно мраморизованных известняков. На участке “Каменка” по одному профилю наблюдаются обогащение Li, Be, Cs, Rb, Tl, Sn, Th и обеднение Bi, а по другому профилю – обогащение Cs, Rb, Cr и обеднение Tl, V, Sn, Pb. В целом можно отметить слабую обогащенность зоны контакта литофильными элементами. Распределение всех этих химических элементов по профилям неравномерное, скачкообразное. Тектоническая зона на участке “Каменка” обогащена Li, Cs, Rb, Mo, Zn, Y, Sc, Zr, обеднена Tl и V.

3. Отсутствие отчетливой зональности в карбонатном обрамлении массива объясняется различными временем и условиями образования мраморов на коллизионном этапе развития Урала и постколлизионной релаксации.

4. Процессы преобразования карбонатных пород в обрамлении гранитогнейсовых массивов Кочкарского и Суундукского антиклинориев в целом совпадают и различаются лишь в деталях, что позволяет говорить об общих закономерностях становления и развития этих коллизионных структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев Е.П., Резницкий Л.З., Бараш И.Г. (1999) Динамическая интерпретация зональных метаморфических комплексов. *Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма*. Мат-лы XXXII Тектонич. совещ. Т. 1. М.: ГЕОС, 114–117.
- Жабин А.Г. (1971) Сингенез и метаморфизм карбонатов. М.: Наука, 167 с.
- Жабин А.Г. (1979) Онтогенез минералов. Агрегаты. М.: Наука, 275 с.
- Кисин А.Ю. (1991) Месторождения рубинов в мраморах (на примере Урала). Свердловск: УрО АН СССР, 130 с.
- Кисин А.Ю. (2007) Деформационные макроструктуры в карбонатных породах гранитогнейсовых комплексов Урала. *Литосфера*, (1), 90–108.
- Кисин А.Ю., Коротеев В.А. (2017) Блоковая складчатость и рудогенез. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 346 с.
- Кисин А.Ю., Мурзин В.В., Томилина А.В., Притчин М.Е. (2016) Рубин-сапфир-шпинелевая минерализация в мраморах Среднего и Южного Урала: геология, минералогия, генезис. *Геология руд. месторождений*, 58(4), 385–402. <https://doi.org/10.7868/s0016777016040031>
- Кисин А.Ю., Притчин М.Е., Озорнин Д.А. (2022) Геолого-структурная позиция Светлинского месторождения золота (Южный Урал). *Зап. Горн. ин-та*, (255), 369–376. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.46>

- Летников Ф.А., Балышев С.О., Лашкевич В.В. (2000) Взаимосвязь процессов гранитизации, метаморфизма и тектоники. *Геотектоника*, (1), 3-22.
- Паталаха Е.И. (1971) О дифференциальной подвижности совместно деформируемых разнородных геологических тел, ее причинах и следствиях (вязкостная инверсия). *Геотектоника*, (4), 15-25.
- Склярков Е.В., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М. (2021) Мраморный меланж: вариации состава и механизмы образования. *Геодинамика и тектонофизика*, **12**(4), 805-825. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-4-0556>
- Страхов Н.М. (1956) О типах и генезисе доломитовых пород (состояние знаний). *Тр. Геол. ин-та АН СССР. Вып. 4. Типы доломитовых пород и их генезис*. М.: АН СССР, 5-27.
- Талицкий В.Г. (1991) Структурные уровни деформаций в земной коре. *Экспериментальная тектоника и полевая тектонофизика*. (Отв. ред. А.В. Чекунов). Киев: Наук. думка, 297-301.
- Талицкий В.Г. (1998) Некоторые механизмы и следствия деформационных объемных эффектов в неоднородной среде. *Геотектоника*, (2), 93-105.
- Талицкий В.Г. (2002) Проблемы моделирования тектонических деформаций и модель структурообразования в геологической среде. *Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология*, (4), 3-12.
- Тевелев Ал.В., Кошелева И.А., Тевелев Арк.В. и др. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Изд. 2-е. Сер. Южно-Уральская. Л. N-40-XXXVI (Кваркено). Объяснит. зап. М.: ВСЕГЕИ, 226 с.
- Томилина А.В., Кисин А.Ю., Суставов С.Г., Ростова А.В. (2016) Мухинит – первая находка на Урале. *Зап. РМО*, (3), 55-63.
- Федоровский В.С., Добржинецкая Л.Ф., Молчанова Т.В., Лихачев А.Б. (1993) Новый тип меланжа (Байкал, Ольхонский регион). *Геотектоника*, **27**(4), 30-45.
- (the Southern Urals). *Zap. Gorn. in-ta*, (255), 369-376. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.46>
- Kisin A.Yu., Murzin V.V., Tomilina A.V., Pritchkin M.E. (2016) Ruby-Sapphire-Spinel Mineralization in Marble of the Middle and Southern Urals: Geology, Mineralogy, and Genesis. *Geology of Ore Deposits*, **58**(4), 385-402 (translated from *Geologiya Rud. Mestorozhdenii*, **58**(4), 344-359).
- Letnikov F.A., Balyshev S.O., Lashkevich V.V. (2000) Interrelation of granitization, metamorphism and tectonics processes. *Geotektonika*, (1), 3-22. (In Russ.)
- Patalakha E.I. (1971) About differential mobility of jointly deformable heterogeneous geological bodies, its causes and consequences (viscous inversion). *Geotektonika*, (4), 15-25. (In Russ.)
- Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M. (2021) Marble mélange: variations of composition and modes of formation. *Geodynamics & Tectonophysics*, **12**(4), 805-825 (translated from *Geodinamika i Tektonofizika*, **12**(4), 805-825). <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-4-0556>
- Strakhov N.M. (1956) About the types and genesis of dolomite rocks (state of knowledge). *Proceedings of the Geological Institute of the USSR Academy of Sciences. Issue 4. Types of dolomite rocks and their genesis*. Moscow, AN SSSR, 5-27. (In Russ.)
- Talitsky V.G. (1991) Structural levels of deformations in the Earth's crust. *Experimental tectonics and field tectonophysics*. (Ed. by A.V. Chekunov). Kiev, Naukova Dumka Publ., 297-301. (In Russ.)
- Talitsky V.G. (1998) Some mechanisms and consequences of deformation volumetric effects in an inhomogeneous environment. *Geotektonika*, (2), 93-105. (In Russ.)
- Talitsky V.G. (2002) Problems of modeling tectonic deformations and a model of structure formation in the geological environment. *Vestn. MGU. Ser. 4. Geol.*, (4), 3-12. (In Russ.)
- Tevelev Al.V., Kosheleva I.A., Tevelev Ark.V. et al. (2018) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200 000. 2nd ed. The South Ural series. Sheet N-40-XXXVI (Kvarkeno). Explanatory note. Moscow, VSEGEI, 226 p. (In Russ.)
- Tomilina A.V., Kisin A.Yu., Joints S.G., Rostova A.V. (2016) Mukhinite is the first find in the Urals. *Zap. RMO*, (3), 55-63. (In Russ.)
- Vasiliev N.P., Reznitsky L.Z., Barash I.G. (1999) Dynamic interpretation of zonal metamorphic complexes. *Tectonics, geodynamics and processes of magmatism and metamorphism*. Materials of the XXXII Tectonic Meeting. Vol. 1. Moscow, GEOS Publ., 114-117. (In Russ.)
- Zhabin A.G. (1971) Syngensis and metamorphism of carbonatites. Moscow, Nauka Publ., 167 p. (In Russ.)
- Zhabin A.G. (1979) Ontogeny of minerals. Aggregates. Moscow, Nauka Publ., 275 p. (In Russ.)

REFERENCES

- Fedorovsky V.S., Dobrzhinetskaya L.F., Molchanova T.V., Likhachev A.B. (1993) A New Type of Melange (Baikal, Ol'khon Region). *Geotektonika*, **27**(4), 30-45. (In Russ.)
- Kisin A.Yu. (1991) Deposits of rubies in marbles (using the example of the Urals). Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 130 p. (In Russ.)
- Kisin A.Yu. (2007) Deformation macrostructures in carbonate rocks of granite-gneiss complexes of the Urals. *Lithosphere (Russia)*, (1), 90-108. (In Russ.)
- Kisin A.Yu., Koroteev V.A. (2017) Block folding and ore genesis. Ekaterinburg, IGG UrO RAS Publ., 346 p. (In Russ.)
- Kisin A.Yu., Pritchkin M.E., Ozornin D.A. (2022) Geological and structural position of the Svetlinsky gold deposit