

УДК 551.251

СВИДЕТЕЛЬСТВА ПОЛИМЕТАМОРФИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ДОКЕМБРИЙСКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЗААНГАРЬЯ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

И.И. Лиханов, В.В. Ревердатто

Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия



На примере тейского и гаревского метаморфических комплексов высокоглиноземистых метapelитов Заангарья Енисейского кряжа, характеризующихся присутствием трех полиморфов Al_2SiO_5 , приведены геолого-структурные, минералого-петрологические и изотопно-геохронологические свидетельства их полиметаморфической истории. В изученных ореолах наложение более поздних минеральных ассоциаций на ранние в ходе разных геодинамических событий четко фиксируется по реакционным структурам и химической зональности минералов, конфигурации P - T трендов и изотопным датировкам. Выявленные индикаторные признаки свидетельствуют о последовательном росте полиморфов Al_2SiO_5 в результате сложной полиметаморфической истории, обусловленной сменой разных тектонических обстановок.

Ключевые слова: P - T тренды эволюции метаморфизма, геотектонические обстановки, высокоглиноземистые метapelиты, полиморфы Al_2SiO_5 , Енисейский кряж

Метаморфические породы присутствуют в большей части литосферы и содержат важную информацию о термодинамических параметрах петрогенезиса. Поэтому метаморфизм является одним из индикаторов эндогенных процессов, а его корреляция с магматизмом и тектоникой позволяет реконструировать последовательность событий при развитии литосферы. Этим объясняется повышенный интерес к особенностям формирования и эволюции метаморфических пород в подвижных поясах на границах древних континентов, где проявлены разные типы метаморфизма.

Юго-западное обрамление Сибирского кратона включает в себя гетерогенные блоки Енисейского кряжа и северных склонов Восточного Саяна в составе Центрально-Азиатского орогенного пояса, что позволяет проводить межрегиональные корреляции для реконструкции сложной тектонической структуры Центральной Азии. Такие реконструкции важны не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов на границах древних кратонов, но и для решения вопроса о вхождении Сибирского кратона в состав суперконтинента Родиния и последующего его распада в неопротерозое с образованием Палеоазиатского океана.

Енисейский кряж, представляющий собой покровно-складчатый ороген, является одним из наиболее интересных в геодинамическом аспекте регионов Сибири. Здесь представлен полный разрез докембрия – от палеопротерозоя до венда включительно. Тесная ассоциация разнообразных магматических и метаморфических комплексов свидетельствует о весьма сложном строении. В частности, важнейшей особенностью метаморфических ком-

плексов Енисейского кряжа является неоднородность метаморфизма по режиму давления, выраженная в проявлении регионального метаморфизма двух фациальных серий: андалузит-силлиманитовой (низких давлений) и кианит-силлиманитовой (умеренных давлений). Метаморфизм умеренных давлений следует за метаморфизмом низких давлений и проявляется локально вблизи надвигов, в результате чего происходит прогрессивное замещение андалузита кианитом и образование новых минеральных ассоциаций и деформационных структур [Likhanov et al., 2004].

Это представляет значительный петрологический интерес, так как известно, что среди прогрессивных минеральных реакций между полиморфными модификациями Al_2SiO_5 наиболее обычны замещения андалузита или кианита силлиманитом, характерные для зональных метаморфических комплексов низких и умеренных давлений. Наблюдаемые в Енисейском кряже замещения андалузита кианитом на прогрессивном этапе метаморфизма являются редкостью, поскольку стационарная континентальная геотерма обычно не пересекает линию равновесия андалузит–кианит [Kerrick, 1990].

Интерес к этим комплексам обусловлен фундаментальными и прикладными аспектами. С одной стороны, минералы группы силлиманита (кианит, андалузит и силлиманит) – важнейшие индикаторы метаморфизма в горных породах. При одинаковом химическом составе они имеют разную кристаллическую структуру, стабильную при различных P - T параметрах [Kerrick, 1990]. На основе различных трендов изменения температуры с глубиной и соотношения этих трендов на P - T диаграмме с полями

устойчивости полиморфов Al_2SiO_5 выделяются разные «барические» типы метаморфизма. Андалузит устойчив при низких давлениях и температурах; с повышением давления он сменяется кианитом, а при увеличении температуры они оба замещаются силлиманитом. Это приводит к формированию зональных метаморфических комплексов, что используется для выделения фациальных серий низких и умеренных давлений. В связи с этим «тройная точка», соответствующая равновесному сосуществованию всех полиморфов Al_2SiO_5 , является одним из наиболее важных инвариантных узлов в метаморфической петрологии, а минеральные ассоциации с участием полиморфов «тройной точки» информативны для калибровки геотермобарометров [Ревердатто и др., 2017].

С другой стороны, минералы группы силлиманита (андалузит, силлиманит, кианит), широко развитые в Заангарской части Енисейского кряжа, представляют особый интерес для производства глинозема, силумина и алюминия. В 1970-х гг. в ходе поисковых и горных работ Ангарской ГРЭ ПГО «Красноярскгеология» здесь были открыты месторождения и рудопроявления минералов группы силлиманита, а в 1990-х гг. перспективы этих месторождений были подтверждены для ряда участков в пределах центральной части Заангарья Енисейского кряжа (маяконский, чиримбинский, панимбинский, тейский и др.) [Лепезин и др., 2010]. В настоящее время суммарные прогнозные ресурсы этих участков в пересчете на полезные минералы на глубину 50 м оцениваются около 200 млн т [Kozlov, 2017]. В последние годы исследование высокоглиноземистых метапелитов приобретает особую актуальность как в прикладном (алюминиевая промышленность России обеспечена глиноземом собственного производства только на 30%, остальные его объемы импортируются из стран ближнего и дальнего зарубежья), так и в теоретическом аспекте в связи с необходимостью создания количественной теории метаморфогенного рудообразования.

В настоящей статье на основе реконструкции P - T - t эволюции метаморфических комплексов высокоглиноземистых метапелитов Енисейского кряжа, характеризующихся присутствием трех полиморфов Al_2SiO_5 , приведены геолого-структурные, минералого-петрологические и изотопно-геохронологические свидетельства их полиметаморфической истории.

Геологическое положение и основные структурные элементы Енисейского кряжа

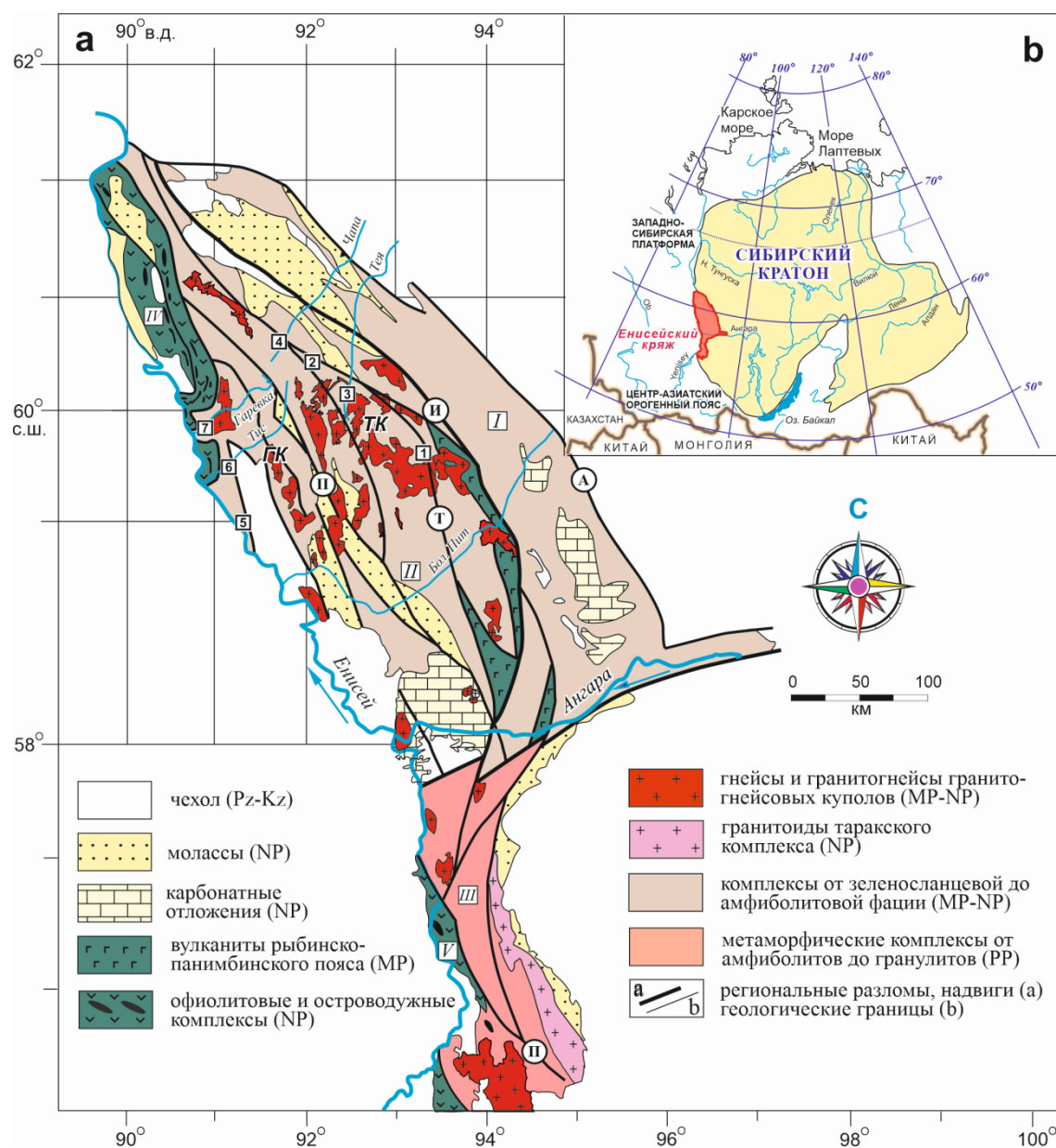
Енисейский кряж представляет собой древний ороген коллизионно-аккреционного типа, расположенный на западной окраине Сибирского кратона. Он вытянут в субмеридианальном направлении вдоль р. Енисей почти на 700 км при ширине от 50 до 200 км

(рис. 1, *b*). Геофизические данные свидетельствуют о вертикальном утолщении и транспрессионной обстановке; ширина складчатой области Енисейского кряжа на глубине более 10 км вдвое уменьшается, что придает ему грибовидную форму [Likhanov, Santosh, 2017]. Глубина залегания поверхности Мохоровича под Енисейским кряжем по сравнению с соседними регионами увеличена от 40 до 50 км.

Таким образом, этот ороген обладает структурой с утолщенной корой, сохранившейся в течение длительного геологического времени. Коллизионная модель формирования структуры земной коры в регионе подтверждается данными сейсмического профилирования и обосновывается «скупиванием» пород неопротерозойских формаций [Козлов и др., 2020]. В строении Енисейского кряжа выделяются два крупных сегмента – Южно-Енисейский и Заангарский, разделенные субширотным Нижнеангарским региональным разломом [Ножкин и др., 2016]. К югу от этого разлома выделяются два структурных элемента – палеопротерозойский кратонный Ангаро-Канский блок и неопротерозойский островодужный Предивинский террейн [Лиханов и др., 2016] (рис. 1, *a*). К северу от Нижнеангарского разлома, в заангарской части, Енисейский кряж сложен палеопротерозойскими и мезо-неопротерозойскими породами, составляющими Восточный и Центральный кратонные блоки и Исаковский (западный) островодужный террейн. Все тектонические блоки и пластины разделены крупными региональными разломами – системами дизъюнктивов преимущественно северо-западного простирания с субвертикальным падением [Ножкин и др., 2011]. Отличительной особенностью приразломных структур является развитие специфического комплекса тектонитов – бластомилонитов и катаклазитов, прослеживающихся через весь кряж в виде ряда мощных зон субмеридианального простирания [Козлов и др., 2012; Бабичев и др., 2019]. Региональные разломы (Приенисейский, Татарско-Ишимбинский и др.) часто сопровождаются оперяющими структурами более высокого порядка, вблизи которых происходит коллизия мелких блоков с образованием надвигов [Егоров, 2004]. Последнее вызывает неоднородный по давлению региональный метаморфизм, выраженный сочетанием двух фациальных серий низких и умеренных давлений [Лиханов и др., 2006; Likhanov, Reverdatto, 2011].

Условия и время заложения региональных глубинных разломов в регионе остаются неясными. Однако интерпретация геохронологических данных разновозрастных популяций монацитов в тектонитах, испытавших перекристаллизацию в ходе последовательных деформационных процессов, указывает на неоднократную активизацию Приенисейской региональной сдвиговой зоны в регионе в диапазоне

Детальный обзор геохронологии, тектонической позиции и геодинамической природы комплексов, участвующих в строении региона, приведены в работах [Лиханов и др., 2014, 2018, 2021]. Там же представлена хронологическая последовательность крупных этапов и событий в геологической истории Енисейского кряжа, сформировавших его тектонический облик.



a – ГК и ТК – гаревский и теийский метаморфические комплексы. Теийский комплекс (ТК): 1 – маяковский, 2 – полканский, 3 – теийский, 4 – чапский; гаревский метакмлекс (ГК): 5 – енисейский, 6 – тисский и 7 – гаревский участки. *b* – положение Енисейского кряжа в структуре Сибирского кратона

a – GC and TC are the Garevka and Teya metamorphic complexes, respectively. Arabic numerals; Teya complex (TC): 1 – Mayakon, 2 – Polkan, 3 – Teya, 4 – Chapa; Garevka complex (GC): 5 – Yenisey R., 6 – Tis R., and 7 – Garevka R., and locations of the five tectonic blocks discussed in the text (roman numerals in squares): I – East (platform) and II – Central blocks of the Transangarian segment; III – South-Yenisey (Angara-Kan) segment, IV – Isakovka and V – Predivinsk island-arc blocks. *b* – the inset map shows position of the Yenisey Ridge in Siberian craton

Характеристика объектов исследования

В качестве объектов исследования выбраны четыре участка в пределах тейского комплекса (маяконский, полканский, чапский и тейский) и три участка в пределах гаревского комплекса (тисский, енисейский и гаревский) Заангарской части Енисейского кряжа (см. рис. 1). Они приурочены к линейным зонам смятия вдоль Татарско-Ишимбинской и Приенисейской систем разломов соответственно. Эти зоны представляют собой систему сближенных субпараллельных разломов сдвиговой, взбросовой и надвиговой кинематики, концентрирующих деформации сдвига, а также их комбинаций с проявлениями приразломного катаклаза, меланжирования и динамометаморфизма породных массивов [Козлов и др., 2020]. Их протяженность определяется сотнями километров при ширине зоны стресс-метаморфизма от сотен метров до первых десятков километров. Как правило, эти линейные зоны играют роль швов, разделяющих тектонические блоки региона и являющихся областями их активного взаимодействия.

В разрезе складчатых структур Центрального блока наиболее древним является гаревский комплекс, в составе которого выделены немтихинская и малогаревская метаморфические толщи [Likhanov, Santosh, 2019]. Гаревский комплекс в западной части Центрального блока надстраивается тейским комплексом, в результате чего малогаревская толща перекрывается нижнепротерозойскими отложениями свиты хребта Карпинского тейской серии. В тектоническом отношении район развития тейского комплекса располагается главным образом в пределах осевой части Центрального блока, складчатая структура которого осложнена серией дизъюнктивов северо-западного простирания, которые относятся к Татарскому глубинному разлому, а также рядом второстепенных надвигов преимущественно субмеридианального направления. Гаревский комплекс располагается в пределах Приенисейской региональной сдвиговой зоны, разделяющей Центральный кратонный блок и Исаковский островодужный террейн [Likhanov et al., 2018].

Важнейшей особенностью изученных метаморфических комплексов является неоднородность метаморфизма по режиму давления, выраженная в проявлении регионального метаморфизма двух фациальных серий: *And-Sil* (низких давлений) и *Ky-Sil* (умеренных давлений). Наиболее характерным примером совмещенной зональности двух фациальных серий является тейский участок (рис. 2), расположенный в среднем течении р. Теи в междуречье Курепы и Уволги [Лиханов и др., 2016].

В геологическом строении этого района принимают участие протерозойские регионально-метаморфические образования тейской и сухопитской серий. В ядре

Тейской антиклинали, запрокинутой на юго-запад под углом 50–65°, обнажены наиболее древние метаморфизованные метакarbonатно-терригенные породы тейской серии нижнего протерозоя, прорванные гранитоидами Каламинского массива. Крылья антиклинали сложены менее метаморфизованными породами кординской и горбилокской свит сухопитской серии нижнего-среднего рифея. В строении региона с юго-запада на северо-восток выделяются четыре зоны регионального метаморфизма со следующей последовательностью предельных минеральных ассоциаций: 1) $Bt + Ms + Chl + Qz + Pl$ (*Bt* зона); 2) $Grt + Bt + Ms + Chl + Qz + Pl$ (*Grt* зона); 3) $St + Grt + Bt + Ms + Chl + Qz + Pl + Crd \pm And$ (*St-And* зона) и 4) $Sil + St + Grt + Bt + Ms + Qz + Pl \pm And \pm Crd$ (*Sil* зона) (рис. 2). Здесь и далее в тексте символы минералов приведены по [Whitney, Evans, 2010].

В пределах *St-And* зоны в малоглиноземистых недосыщенных K_2O метатерригенных породах рязановской свиты иногда устойчив жедрит и куммингтонит в ассоциации с гранатом и кордиеритом. В целом в изученном районе региональный метаморфизм характеризуется симметричной зональностью в структуре Тейской антиклинали и отличается ростом степени метаморфизма по направлению к ядру антиклинали. По характеру метаморфической зональности прогрессивный метаморфизм изученных пород относится к сравнительно малоглубинному *LP/HT* андалузит-силлиманитовому типу (бьюкенский тип зональности), промежуточному между пиренейским и мичиганским типами зональности по классификации А. Хитанен [Hietanen, 1967]. Его *P-T* условия соответствуют переходу от фации зеленых сланцев до границы между эпидот-амфиболитовой и амфиболитовыми фациями. С приближением к надвигу породы *St-And* и *Sil* зон испытывают наложенный метаморфизм. Этот переход фиксируется по появлению в регионально-метаморфических породах кианита и фибролита – волокнистой игольчатой разновидности силлиманита (изограда кианита) с развитием предельной ассоциации $Ky + St + Grt + Ms + Bt + Qz + Pl + Sil + Fi$ с реликтами *And*. Временные соотношения между появлением кианита и фибролита не установлены. Область распространения пород кианит-ставролитовой субфации фации кианитовых сланцев ограничена разломом северо-западного простирания и не превышает в ширину 4–5 км, что наряду с секущим характером новых изоград свидетельствует о локальном характере наложенного метаморфизма. Появление *Ky* и развитие новых деформационных структур свидетельствует о том, что наложенный метаморфизм проходил в обстановке повышенного давления и может быть отнесен к *Ky-Sil* типу (барровианский тип зональности). Региональный метаморфизм *And-Sil* типа осуществлялся в широком диапазоне пико-

вых температур от 510 °С в биотитовой зоне до 640 °С в силлиманитовой зоне при изменении дав-

ления от 3,9 до 5,1 кбар, что свидетельствует о метаморфическом градиенте $dT/dH = 25\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

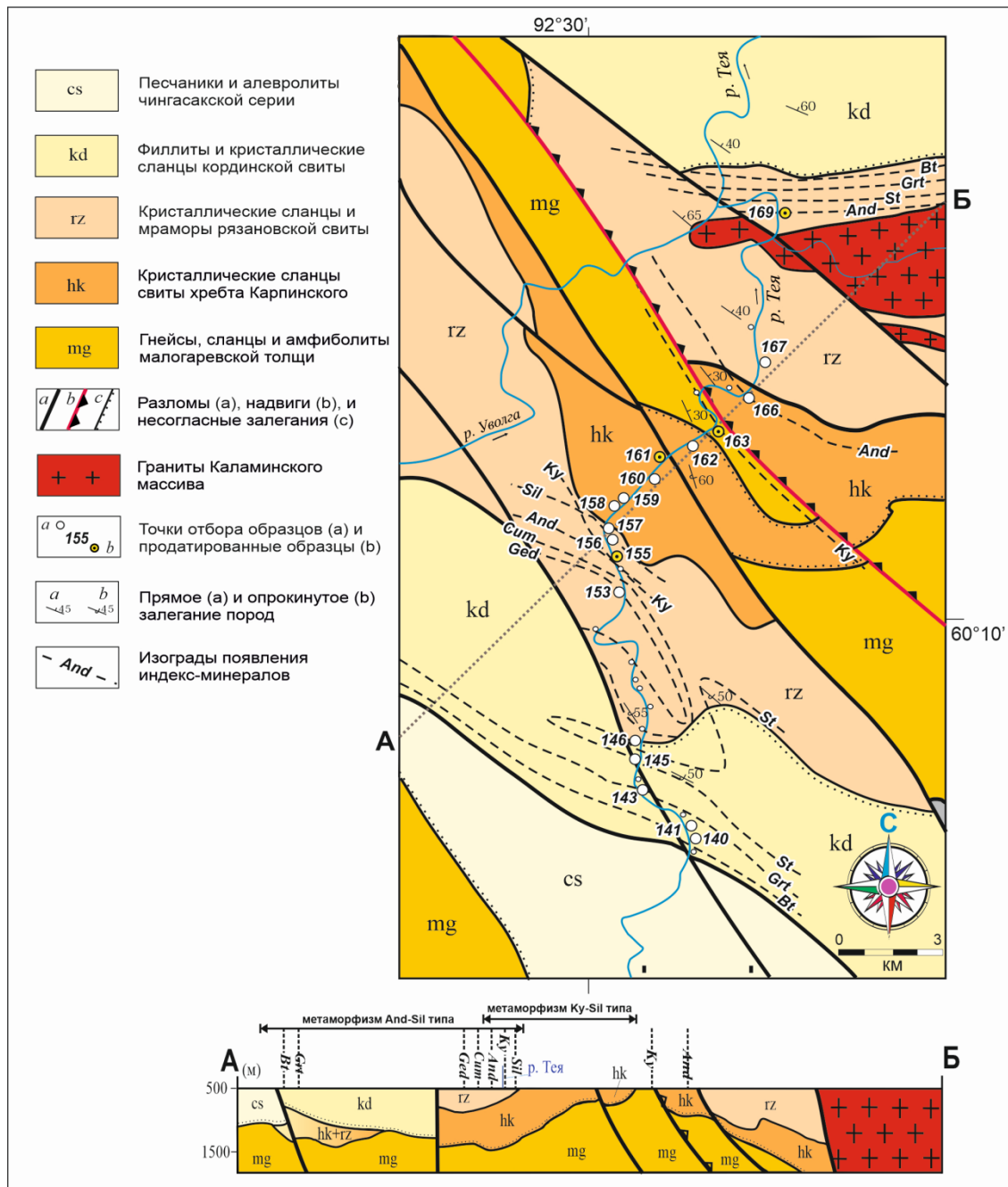


Рис. 2. Схематическая карта тейского полиметаморфического комплекса в среднем течении р. Тея (чапский участок) и разрез по линии А–Б

Fig. 2. Sketch map of the Teya polymetamorphic complex in the middle reaches of the Teya River (Chapa area) and geological cross section through A–B line

Наложенный метаморфизм умеренных давлений *Ky-Sil* типа происходил при постепенном повышении давления от 5,65 до 7,15 кбар при незначительном повышении максимальной температуры (от 660 до 700 °С) при приближении к надвику, что указывает на весьма низкое значение $dT/dH \leq 10\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ [Лиханов и др., 2011а].

Относительно местоположения тейского участка, полканский и чапский участки располагаются северо-западнее в 40 и 70 км соответственно; маяконский участок находится в 80 км на юго-восток, а тисский участок – в 100 км на юго-запад (см. рис. 1).

Полканский участок, выделенный в междуречье Чапы–Гаревки–Тиса в районе горы Гаревский Пол-

кан (рис. 3), принадлежит антиклинорию хребта Карпинского северо-западного простирания. В геологическом строении района принимают участие нижнепротерозойские (1650–1500 млн лет) регионально-метаморфические породы свиты хребта Карпинского с пологим (10–15°), почти горизонтальным залеганием и мощностью около 3 км, слагающие Полканскую антиклиналь. В районе исследования наиболее удаленные от надвига метapelиты низких давлений представлены минеральной ассоциацией $Ms + Chl + Bt + Cld + And + St + Qz + Pl + Ilm$, испытавшие с приближением к надвику коллизионный метаморфизм умеренных давлений кианит-силлиманитового типа. Видимая мощность распространения этих пород, ограниченная на западе надвигом, на востоке – разломами северо-западного простирания, не превышает 4–5 км. В пределах этой территории по особенностям структурно-вещественного преобразования метapelитов параллельно шву надвига выделяются три метаморфические зоны. Предельная ассоциация $Ky + St + Grt + Ms + Bt + Qz + Pl + Sil$ с реликтами андалузита и хлоритоида возникла в условиях фации кианитовых сланцев [Лиханов и др., 2011a].

Маяконский участок находится в бассейнах рек Еруда и Чиримба, где мезопротерозойские (1350–1250 млн лет) осадочные породы кординской свиты испытали метаморфизм низких и умеренных давлений [Лиханов и др., 2001] (рис. 4). В районе исследования метapelиты низких давлений, представленные $Ms + Chl + Bt + Cld + And + Qz + Ilm \pm Crd$ минеральной ассоциацией, образовались в условиях зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фации. Породы умеренных давлений, характеризующиеся ассоциацией $Ms + Chl + Bt + Qz + Ky + St + Grt + Ilm + Pl$ с реликтами андалузита и присутствием силлиманита и фибролита, метаморфизованы в условиях фации кианитовых сланцев. Они слагают зону шириной от 5 до 7 км и протяженностью не менее 20 км, ограниченную с востока Панимбинским надвигом северо-западного простирания, за которым северо-восточнее развиты нижнепротерозойские метатерригенно-карбонатные породы тейской серии. Параллельно шву Панимбинского надвига выделены три метаморфические зоны наложенного метаморфизма, различающиеся соотношением реликтовых и новообразованных минералов и степенью деформации пород [Лиханов и др., 2007].

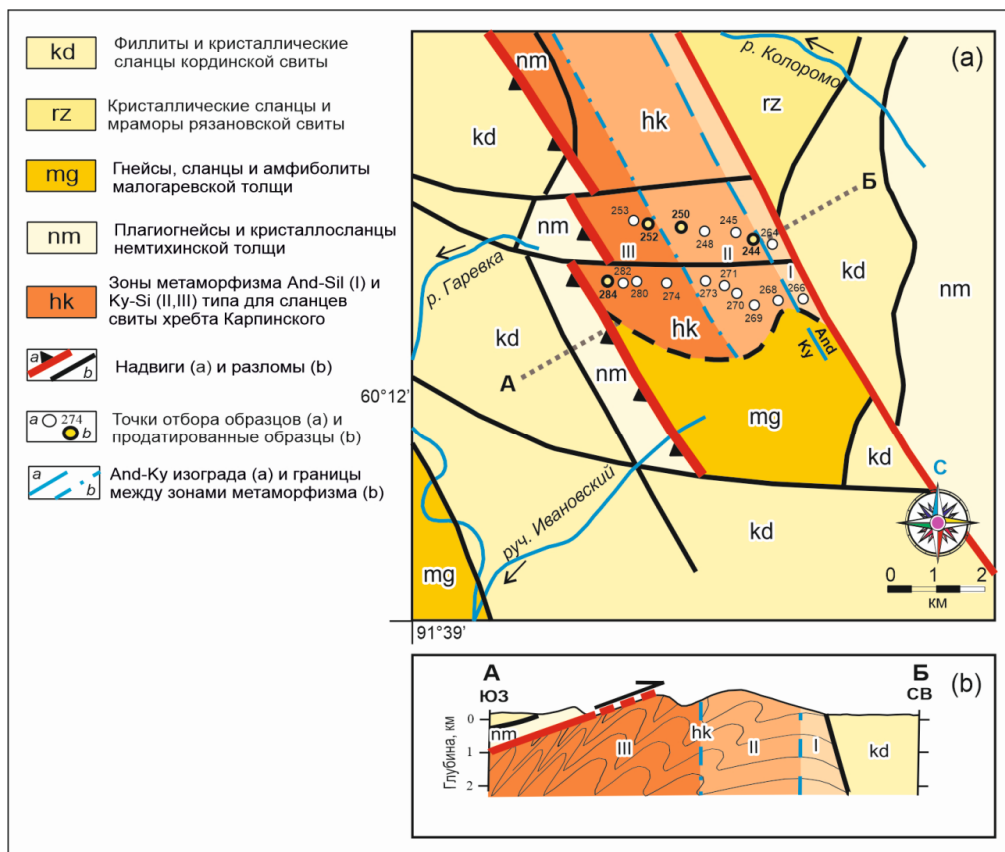


Рис. 3. Схематическая карта докембрийских метаморфических образований района горы Гаревский Полкан (полканский участок) (a) и разрез по профилю А–Б (b)

Направление движения показано стрелкой на рис. 3, b

Fig. 3. Schematic geological map of the Polkan area of the Teya complex, showing location of metamorphic zones in metapelites (a), and schematic cross section A–B across the overthrust (b)

Direction of thrust motion is shown by arrow on Figure 3b

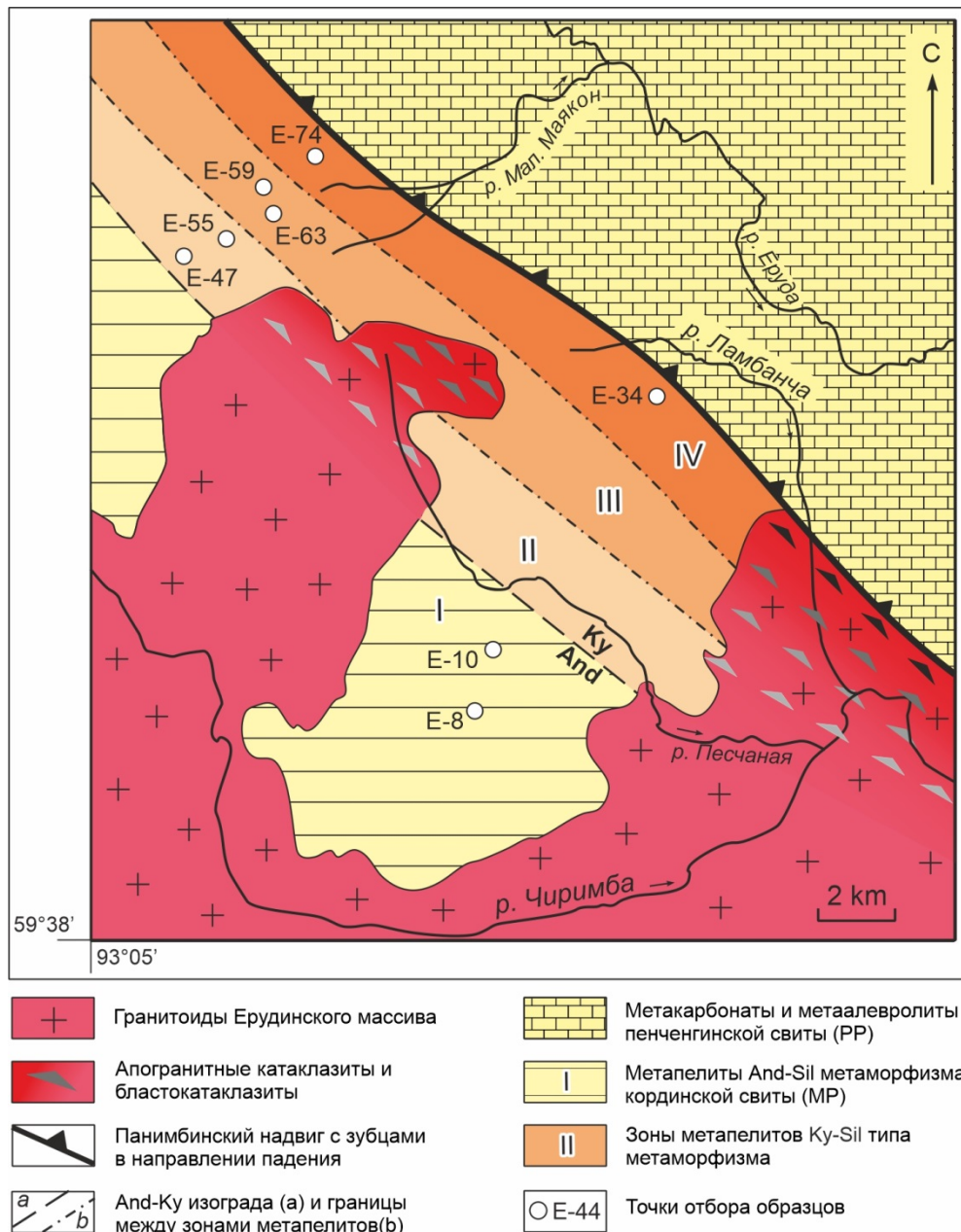


Рис. 4. Схематическая карта метаморфизма междуречья рек Еруда и Чиримба (маяконский участок)

Fig. 4. Geological sketch map of the Mayakon area in the Eruda and Chirimba Rivers interfluve in the vicinity of the Panimba overthrust showing location of metamorphic zones in metapelites

Чапский участок расположен в среднем течении р. Чапа между устьями ее притоков Нижняя Ведуга и Еловая [Лиханов и др., 20086] (рис. 5). В его геологическом строении принимают участие нижнепротерозойские (≥ 1650 млн лет) осадочно-метаморфические образования тейской серии, слагающие Чапскую антиклиналь, шарнир которой погружается в северо-западном направлении под углом $15-30^\circ$. В ядре антиклинали выходят кварциты и кристаллические сланцы свиты хребта Карпинского; крылья антиклинали сложены метатерригенно-карбонат-

ными породами (мраморы с подчиненным количеством кристаллических сланцев) пенченгинской свиты. В районе исследования наиболее удаленные от надвига метapelиты низких давлений пенченгинской свиты и свиты хребта Карпинского, представленные, соответственно, минеральными ассоциациями $Ms + Chl + Bt + Qz + Pl$ и $And + St + Sil + Grt + Ms + Bt + Qz + Chl$, образовались в условиях зеленосланцевой и низов амфиболитовой фаций. Пространственный переход от регионально-метаморфических пород низких давлений к породам более вы-

соких давлений фиксируется по одновременному появлению в породах кианита (изограда кианита). Ширина области распространения этих пород составляет 5–7 км и ограничена с востока надвигом северо-западного простирания [Лиханов и др., 2006].

Тисский участок, расположенный в нижнем течении р. Тис, является типичным для Гаревского комплекса, включающего также енисейский и гаревский участки (см. рис. 1). В районе исследования его породы представлены интенсивно деформированными и мигматизированными гнейсами и кристаллическими сланцами с предельной ассоциацией $Grt + Bt + Ms + Pl + Qz \pm St \pm Ilm \pm Ky \pm Sil \pm And \pm Ep$ состава, пронизанными крутопадающими расланцеванными дайками гранитов и габброидов [Лиханов и др., 2013б]. Отличительной особенностью изученных метapelитов является развитие специфических порфиробласт граната с тремя контрастными зонами (рис. 6). Ядра сложены гранатом округлой или эллипсовидной формы с хаотически ориентированными включениями минералов основной массы. Их обрамляет средняя зона деформированного граната с обилием черных микровключений ильменита

и графита. Внешняя оболочка сложена идиоморфным гранатом. Наряду с обильными включениями минералов основной массы, практически во всех зонах гранатов присутствуют монацит, а ксенотим и эпидот встречаются только во внутренней зоне [Likhanov et al., 2015].

Для всех изученных участков с ассоциацией «тройной точки» наблюдается похожая закономерность в изменении набора минеральных ассоциаций в аналогичных по температуре метаморфических зонах, но с различным соотношением реликтовых и новообразованных минералов и степенью деформации пород. Некоторые минералогические отличия обусловлены отсутствием кордиерита (чапский, тисский и полканский участки) и развитием хлоритоида (полканский и маяконский участки) на самых низких ступенях метаморфизма. Появление редких парагенезисов ($Cld + Bt$ и $Cld + Bt + And$) и изменение характера зональности в метapelитах *And-Sil* типа полканского и маяконского участков может быть связано с большей устойчивостью Mn-граната на средних ступенях метаморфизма [Лиханов и др., 2005].

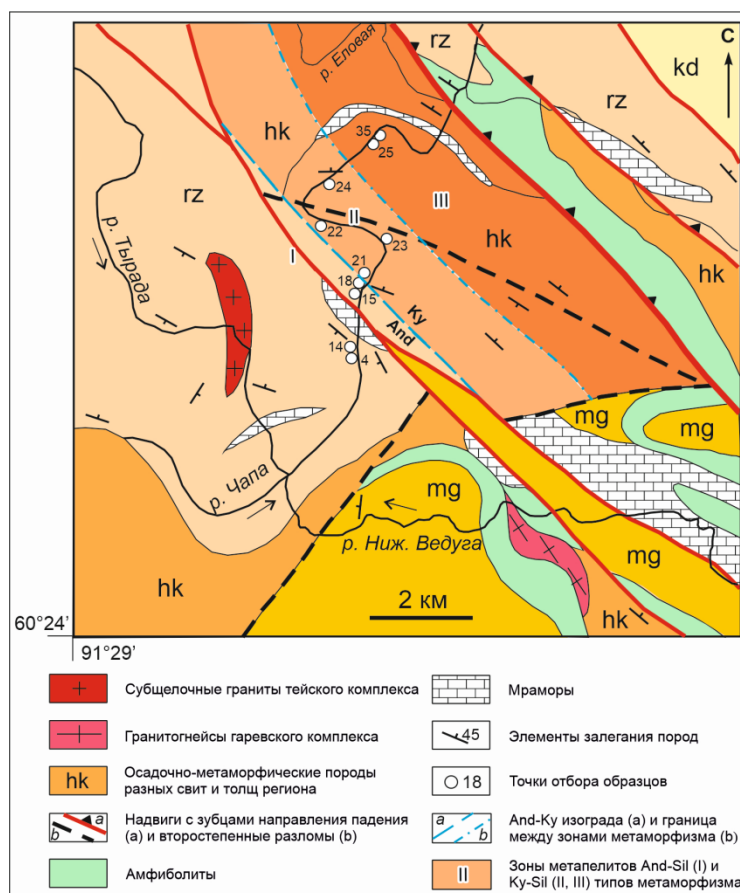


Рис. 5. Схема геологического строения докембрийских кристаллических осадочно-метаморфических образований района верхнего течения р. Чапа (чапский участок)

Fig. 5. Schematic geological map of crystalline metasedimentary rocks from the Chapa area in the upper reaches of the Chapa River showing location of metamorphic zones in metapelites of the Teya Sequence

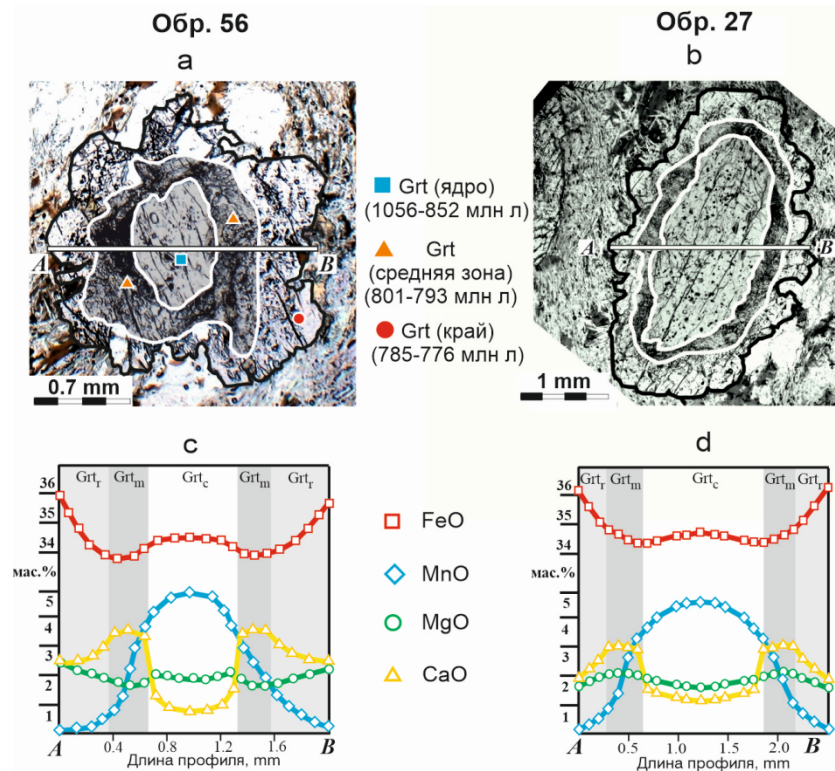


Рис. 6. Микрофотографии зерен граната из гнейсов гаревского (а) и енисейского (б) участков, и концентрационные профили по главным элементам (с, d), построенные по линиям А–В

Здесь и далее в тексте: Grt_с, Grt_м и Grt_р – составы ядра, средней зоны и каймы в зернах граната. Показаны места точек датирования включений с возрастными в различных генерациях граната из обр. 56

Fig. 6. Photomicrographs of samples 56 (a) and 27 (b) showing texture features developed within garnets from pelitic gneisses and schists in the Garevka complex. Compositional profile across a zoned garnet porphyroblasts (sample 56 – c, sample 27 – d) with three growth zones is indicated by the light line A–B

Compositionally distinct zones of garnet are indicated by white (core-Grt_с), and different shades of grey (middle-Grt_м and rim-Grt_р). The locations of dated samples (sample 56 – a) are given with the age of the dated grain corresponding to the symbol that they are represented by

Микроструктурные взаимоотношения между полиморфами Al_2SiO_5 свидетельствуют о последовательном росте андалузита, силлиманита, фибролита и кианита при метаморфизме с преобладанием различных схем реакционных замещений между этими минералами [Likhanov, Santosh, 2020] (рис. 7). Для маяконского участка характерны следующие реакционные соотношения: – $\text{And} \rightarrow \text{Ky} \rightarrow \text{Sil} \pm \text{Fi}$; для полканского участка – $\text{And} \rightarrow \text{Ky} \rightarrow \text{Sil}$; для чапского участка – $\text{And} \rightarrow \text{Sil} + \text{Ky}$; для тейского участка – $\text{And} \rightarrow \text{Sil} \rightarrow \text{Ky} + \text{Fi}$. Эти особенности обусловлены сложной метаморфической историей пород, связанной со сменой тектонических обстановок [Лиханов, 2020б]. Некоторые микротекстуры интерпретируются в шлифах неоднозначно. В этих случаях реакционные взаимоотношения между полиморфами Al_2SiO_5 предсказывались главным образом по наблюдаемой метаморфической зональности – последовательности смены закартированных изоград первого появления кианита/силлиманита и расчетам P - T - t трендов эволюции пород.

Геохимическая специфика и особенности происхождения пород

По химическому составу эти $\text{And} + \text{Ky} + \text{Sil}$ -содержащие породы классифицируются как низкокальциевые ($< 1,5$ мас. %) и умеренно-насыщенные K_2O (3–4 мас. %) метапелиты, одновременно обогащенные железом (Fe_2O_3 до 12 мас. %) и глиноземом (Al_2O_3 до 28 мас. %). На петрохимической диаграмме Г. Симмса и Дж. Ферри [Symmes, Ferry, 1992] эти породы относятся к железистым ($X_{\text{Fe}} = \text{FeO} / [\text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}] = 0,6–0,8$ на мольной основе) и глиноземистым ($X_{\text{Al}} = [\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{K}_2\text{O}] / [\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{K}_2\text{O} + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}] = 0,4–0,6$) метапелитам по сравнению со средними составами типичных метапелитов, характеризующихся значениями $X_{\text{Fe}} = 0,52$ и $X_{\text{Al}} = 0,13$ [Shaw, 1956; Ague, 1991]. В отличие от обычных метапелитов, на треугольной диаграмме AFM [Thompson, 1957] область таких химических составов располагается выше конноды гранат–хлорит (рис. 8).

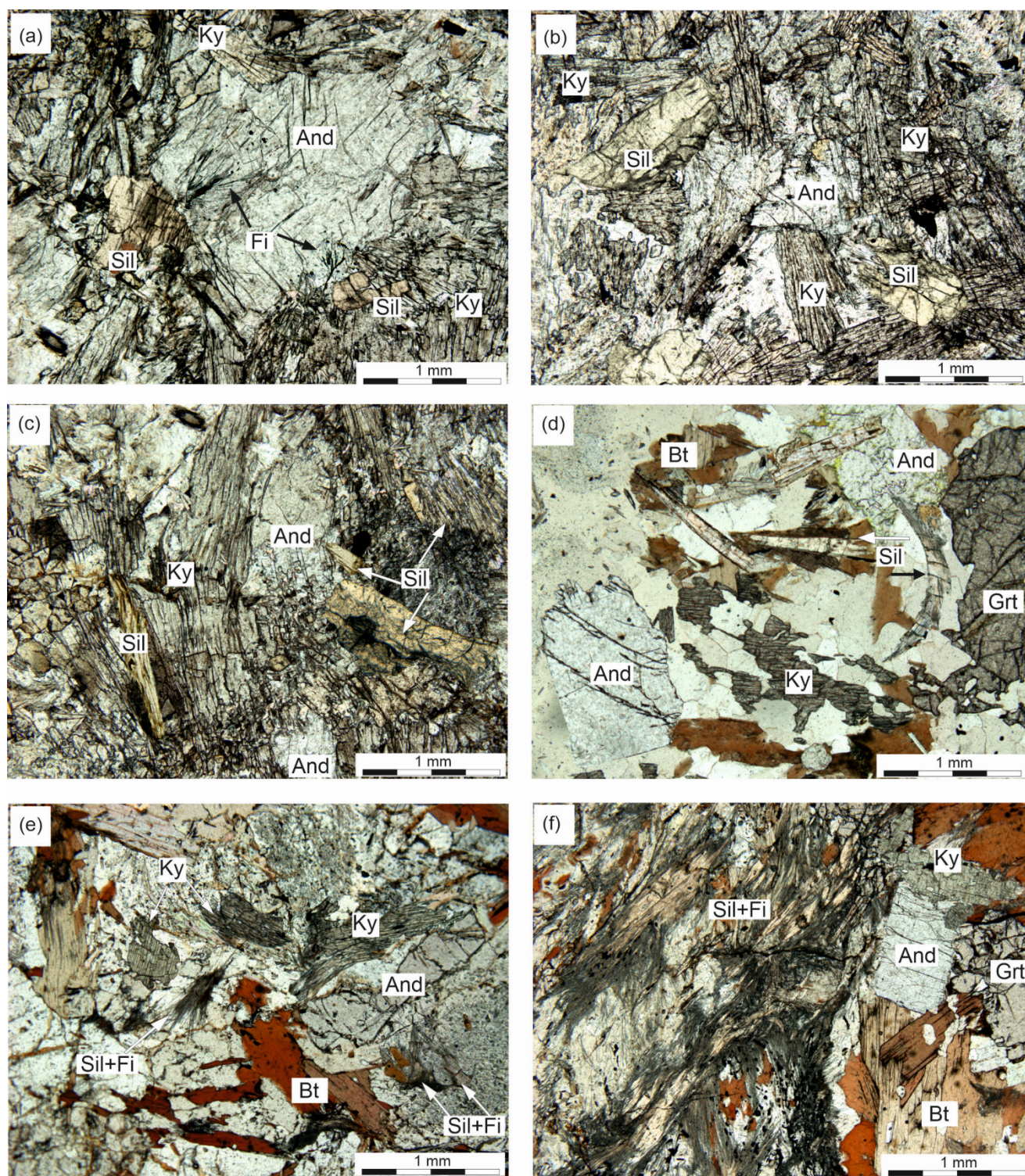


Рис. 7. Микрофотографии петрографических шлифов метapelитов, иллюстрирующие микроструктурные взаимоотношения между полиморфами Al_2SiO_5 участков тейского комплекса

Схемы реакционных замещений для разных участков с ассоциацией «тройной точки»: (a, b – маяконский) $And \rightarrow Ky \rightarrow Sil \pm Fe$; (c – полканский) $And \rightarrow Ky + Sil$; (d – чапский) $And \rightarrow Sil \rightarrow Ky$; (e, f – тейский) $And \rightarrow Sil \rightarrow Ky + Fe$

Fig. 7. Photomicrographs showing typical microtextural relationships among the Al_2SiO_5 polymorphs – andalusite, sillimanite, and kyanite – in study areas of the Teya complex

A prograde sequences involve a different reaction replacements: (a, b – Mayakon area) $And \rightarrow Ky \rightarrow Sil \pm Fe$; (c – Polkan area) $And \rightarrow Ky + Sil$; (d – Chapa area) $And \rightarrow Sil \rightarrow Ky$; and (e, f – Teya area) $And \rightarrow Sil \rightarrow Ky + Fe$

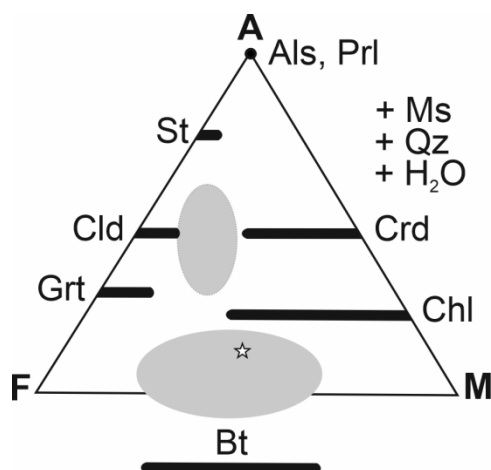


Рис. 8. Диаграмма AFM, иллюстрирующая химические составы пород и минералов типичных (затемненный эллипс, вытянутый в направлении F–M) и железисто-глиноземистых метapelитов (затемненный эллипс, вытянутый в направлении вершины A) [Likhanov, 1988]

Звездочкой показан средний состав типичных метapelитов [Ague, 1991; Symmes, Ferry, 1992]

Fig. 8. AFM diagram projected from muscovite, quartz, and water showing schematically the positions of common (typical) metapelites (dark-gray ellipsis elongated in the F–M direction, below the Grt–Chl tie line) and highly aluminous pelites and other related aluminous rock types (dark-gray ellipsis elongated towards the A top, above the Grt–Chl tie line) [Likhanov, 1988]

A = $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}3\text{K}_2\text{O}$; F = FeO, M = MgO. Asterisk denotes the average composition of typical metapelites after [Ague, 1991; Symmes, Ferry, 1992]

Содержания редких элементов и их индикаторных отношений в изученных метapelитах разных комплексов похожи [Лиханов и др., 2008а; Лиханов, Ревердатто, 2011; Likhanov et al., 2015].

Совокупности распределения редкоземельных элементов, нормированные к составу хондрита, для большинства метapelитов характеризуются четко выраженной отрицательной европиевой аномалией Eu/Eu^* и имеют существенный отрицательный наклон концентрационного профиля, о чем свидетельствуют повышенные величины отношений $(\text{La}/\text{Yb})_n$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_n$ и LREE/HREE . Такие геохимические особенности пород обусловлены присутствием в детритовом материале продуктов эрозии гранитоидов [Likhanov, Reverdatto, 2007]. Унаследованность первичного состава магматического субстрата подтверждается высокой положительной линейной корреляцией между содержаниями высокозарядных некогерентных элементов – Zr, Hf, Y, Ta, Nb [Likhanov, Reverdatto, 2008]. На их происхождение из протолитов кислого состава указывают также повышенные отношения Th/Sc , Th/U и пониженные Co/Th относительно среднего состава постархейских глинистых сланцев. Ранними реконструкциями состава протолита аналогичных по составу железисто-глиноземистых метapelитов гаревского и тейского комплексов было установлено, что они представляют собой переотложенные и метаморфизованные продукты докембрийских кор выветривания каолинового типа [Лиханов и др., 2008б]. Образование

протолита этих пород происходило за счет размыва палеопротерозойских гранитогнейсов Сибирского кратона с возрастaми в диапазоне 1,9–2,1 млрд лет [Лиханов, Ревердатто, 2011]. Об этом же свидетельствует присутствие в источниках сноса во время формирования тейской и малогаревской толщ высококодифференцированного гранитного материала [Ножкин и др., 2008].

Обсуждение результатов: свидетельства полиметаморфизма

Анализ полученных данных о развитии земной коры в регионе позволяет выявить особенности и установить индикаторные признаки полиметаморфизма. Наложение более поздних минеральных ассоциаций на ранние в ходе разных геодинамических событий четко диагностируется по реакционным структурам и химической зональности минералов, конфигурации P – T трендов и изотопным датировкам [Лиханов, 2020а].

По результатам геолого-структурных, минерало-петрологических и изотопно-геохронологических исследований метаморфических комплексов Заангарья Енисейского края были выделены несколько этапов в их развитии, различающиеся термодинамическими режимами и величинами метаморфических градиентов (рис. 9). Во всех изученных случаях неопротерозойский Ky - Sil метаморфизм умеренных давлений накладывался на регионально-метамор-

фические андалузитсодержащие породы низких давлений [Лиханов и др., 2011a]. Зональные метаморфические комплексы низких давлений *LP/HT* ($P = 3,9\text{--}5,1$ кбар, $T = 510\text{--}640$ °C) андалузит-силлиманитового типа сформировались при типичном для орогенеза метаморфическом градиенте $dT/dH = 20\text{--}30$ °C/км. В последовательности пород *Ky-Sil* метаморфизма тейского комплекса наиболее высокобарические и высокотемпературные метапелиты чапского ($P = 5,8\text{--}8,4$ кбар, $T = 630\text{--}710$ °C, $dT/dH = 12\text{--}14$ °C/км), тейского ($P = 5,65\text{--}7,15$ кбар, $T = 650\text{--}700$ °C, $dT/dH = 10\text{--}12$ °C/км) и полканского ($P = 5,0\text{--}7,3$ кбар, $T = 575\text{--}645$ °C, $dT/dH = 8\text{--}10$ °C/км) участков встречаются на севере региона и приурочены к более древним нижнепротерозойским толщам тейской серии [Лиханов и др., 2009]. По сравнению с ними метапелиты маяконского участка, залегающие южнее среди более молодых среднерифейских пород

кординской свиты, отличаются несколько пониженными значениями P - T параметров и метаморфического градиента ($P = 4,5\text{--}6,7$ кбар, $T = 560\text{--}600$ °C, $dT/dH = 6\text{--}7$ °C/км) (см. рис. 1). Метапелиты тисского участка гаревского комплекса занимают промежуточное положение ($P = 4,8\text{--}7,4$ кбар, $T = 580\text{--}640$ °C, $dT/dH = 8\text{--}10$ °C/км). Максимальные значения P - T параметров свойственны метапелитам чапского участка, характеризующихся повсеместным присутствием силлиманита практически во всех метаморфических зонах. В других проявлениях метаморфизма *Ky-Sil* типа силлиманит встречается реже. Фибролит, как правило, появляется локально вблизи гранитов (маяконский и тейский участок), что может свидетельствовать об его контактово-метаморфическом происхождении при внедрении интрузий магматических расплавов [Likhanov et al., 2001].

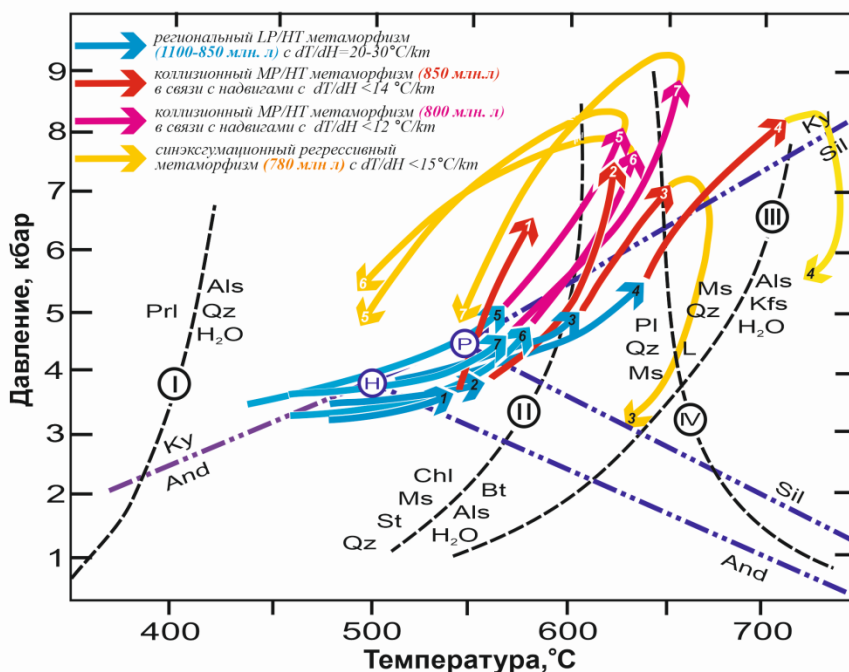


Рис. 9. P - T тренды метаморфизма для высокоглиноземистых метапелитов
Заангарья Енисейского кряжа

Арабские цифры на сегментах P - T траекторий соответствуют изученным регионам Енисейского кряжа: тейский комплекс (ТК): 1 – маяконский, 2 – полканский, 3 – тейский, 4 – чапский; гаревский комплекс: 5 – енисейский, 6 – тисский и 7 – гаревский участки. Пунктирными линиями с римскими цифрами приведены известные минеральные равновесия для метапелитовой системы: I – [Haas, Holdaway, 1973]; II – [Pattison, 2001], III – линия солидуса пелитов в водонасыщенной системе [Le Breton, Thompson, 1988], IV – [Chatterjee, Johannes, 1974]. Координаты тройной точки и линии моновариантных равновесий полиморфов Al_2SiO_5 приведены по [Pattison, 1992] (P) и [Holdaway, 1971] (H). Номера объектов исследования показаны в соответствии с рис. 1

Fig. 9. P - T diagram showing the generalized P - T path calculations for highly aluminous metapelites
in the Teya and Garevka complexes

The prograde segments of P - T trajectories derived from chemical zonation patterns in minerals correspond to the low-pressure regional metamorphism (blue arrows) and medium-pressure collision-related metamorphism (red (TC) and purple (GC) arrows). The retrograde segment of the P - T path (yellow arrows) reflects the post-collision thrust exhumation of the rocks to upper crustal levels. Curve I is the lowest temperature stability of Al_2SiO_5 in aluminous pelites [Haas, Holdaway, 1973]; curve II shows the upper stability of staurolite + quartz + muscovite + chlorite [Pattison et al., 2002]; curve III is muscovite + quartz breakdown [Chatterjee, Johannes, 1974]; curve IV shows minimum wet melting curve for pelites [Le Breton, Thompson, 1988]. The coordinates of the aluminum silicate triple point and univariant equilibrium curves of Al_2SiO_5 polymorphs are after Pattison [1992] (P) and Holdaway [1971] (H). Curve 1 – Mayakon area, curve 2 – Polkan area; 3 – Teya area, and 4 – Chapa area, 5 – Yenisey River, 6 – Tis River, 7 – Garevka River

В целом среди общих геологических и петрологических особенностей *Ky-Sil* метаморфизма выделяют развитие деформационных структур и кианитсодержащих бластомилонитов по андалузитсодержащим породам регионального метаморфизма, незначительная видимая мощность зонального метаморфизма умеренных давлений (от 2,5 до 7 км) и постепенное повышение общего давления при приближении к надвигам (от 4,5–5 до 6,5–8 кбар) при незначительных вариациях температуры, что свидетельствует о весьма низком метаморфическом градиенте от 7 до 14 °C/км. Эти особенности являются характерными признаками коллизионного метаморфизма, обусловленного тектоническим утолщением земной коры в результате надвига с последующим быстрым подъемом и эрозией [Likhanov, Reverdatto, 2011].

Надвигание блоков пород осуществлялось в зонах глубинных разломов со стороны Сибирского кратона (тейский, маяконский и чапский участки) или в результате встречных движений в зоне опережающих разломов более высокого порядка (полканский и участки гаревского комплекса). В рамках этой модели низкие значения геотермического градиента и слабое развитие температурной зональности в метаморфических комплексах коллизионных орогенов связывались с относительной кратковременностью событий и с тем, что не было достигнуто термическое равновесие между взаимодействующими блоками пород на соответствующих глубинах из-за тепловой инерции относительно давления [Коробейников и др., 2006].

С учетом данных по кинетике обратных метаморфических реакций для этого необходимы относительно высокая скорость подъема погруженных на глубину пород и отсутствие флюидов на раннем этапе быстрой эксгумации [Скляр, 2006], что могло служить причиной сохранности умеренно барических ассоциаций прогрессивного метаморфизма в областях с надвиговой тектоникой [Likhanov et al., 2015]. По результатам геотермобарометрии и ^{40}Ar - ^{39}Ar датировкам по слюдам была рассчитана скорость эксгумации пород для полканского участка, равная ~0,4 мм/год [Лиханов и др., 2011а]. Эта величина близка с рассчитанными величинами скорости надвига с использованием теплофизического моделирования для маяконского участка 350 м/млн лет [Likhanov et al., 2004] и согласуется с результатами других авторов по ^{40}Ar - ^{39}Ar датировкам [Corsini et al., 2010] и возрастам, полученным трековым методом по апатиту [Leech, Stockli, 2000].

Длительность подъема пород до уровня изотермы 330 °C (температуры закрытия К-Аг изотопной системы), вычисленная с учетом линейной скорости эксгумации, составляет от 16 до 25 млн лет, что соответствует оценкам С.П. Кориковского [Кориковский, 1979] о продолжительности регрессивных этапов метаморфизма в зонах коллизии и субдукции.

Полученные *P-T* тренды метаморфизма для изученных пород тейского и гаревского комплексов согласуются с *P-T* эволюцией метаморфических пород из других коллизионных орогенов мира, где прогрессивные преобразования *And*→*Ky* объяснялись тектоническим утолщением коры в связи с надвиговой тектоникой [Spear et al., 2002; Beddoe-Stephens, 1990].

Отличительными структурно-текстурными характеристиками умеренно барических пород *Ky-Sil* типа от *And-Sil* фациальных серий являются линейная деформационная гнейсовидность, наличие упорядоченных структур катакластического и пластического течения, растяжение и разрыв складок течения с кулисообразной морфологией, полосы излома в слюдах, «тени давления» перекристаллизованного кварца, S-образные и сильно деформированные зерна граната со структурами «снежного кома», разрывы минеральных зерен со смещением и формированием «лоскутных» полосок, параллельное распределение мелкозернистых линзообразных минеральных агрегатов, а также расщепление и катаклаз [Козлов и др., 2020; Лиханов и др., 2021; Likhanov et al., 2018].

В числе главных минералогических признаков, указывающих на наложение более высокобарического этапа метаморфизма, наиболее важным является характер зональности гранатов, проявленный в значительном росте содержания гроссулярового (от 1 до 6 мас. %) и уменьшении спессартиновых компонентов синхронно со слабыми вариациями других минералов [Лиханов, Reverdatto, 2014а, б] (см. рис. 6). В то же время биотиты в ассоциации с андалузитом и силлиманитом отличаются от биотитов в метапелитах *Ky-Sil* типа пониженным содержанием Ti (0,1–0,15 против 0,15–0,2; величины в формульных коэффициентах) и повышенным содержанием Si (2,8–3,0 против 2,65–2,75) и Al^{VI} (0,8–0,9 против 0,35–0,45). Во всех случаях крутые положительные наклоны *P-T* трендов эволюции наложенного метаморфизма коррелировали с относительно резким повышением содержания *Grs* компонента и значительным уменьшением *Sps* минерала при малом уменьшении железистости ($\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$), обусловленным слабыми вариациями *Prp* и *Alm* компонентов (рис. 10).

Похожая зональность гранатов и, соответственно, аналогичные *P-T* тренды метаморфизма характерны для большинства надвиговых областей Новой Англии в США [Spear et al., 1990, 2002; Kohn et al., 1992] и провинции Мойн в Шотландии [Cutts et al., 2010], отличающихся низким метаморфическим градиентом. Эти наблюдения также согласуются с данными по профилированию зональных гранатов из достоверно полиметаморфических комплексов, где датирование этапов метаморфизма осуществлялось *in situ* по включениям монацитов и ксенотимов в разных генерациях граната [Cutts et al., 2010; Likhanov et al., 2015].

Интересная редкая зональность обнаружена в полициклических гранатах из гнейсов Австроальпийско-

го фундамента Тауэрн Уиндоу, сформированная при коллизии континент–континент в ходе раннеальпийской орогении. Там, на границе между разными генерациями граната, происходит почти вертикальный скачокgrossулярового компонента от Grs_5 (1 мас. % CaO) до Grs_{19} (7 мас. % CaO) при незначительном снижении MgO, вслед за которым формируется проградная зональность в Grt кайме со снижением grossулярового компонента и с крутым ростом пиропового минала, символизирующими увеличение, главным образом, температуры [Bestel et al., 2009; Gaides et al., 2008; Faryad, Chakraborty, 2005].

Установленная специфика химической зональности гранатов, проявленная в значительном росте содержания grossулярового и уменьшении спессартинового компонентов синхронно со слабыми вариациями дру-

гих миналов, является характерным диагностическим признаком коллизионных процессов в метapelитах.

В противоположность этому для гранатов, сформированных при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте, типичны синхронные плавные повышения содержаний CaO и MgO в новообразованных оболочках при уменьшении содержания спессартинового минала и общей железности, указывающие на равномерный рост давления и температуры при одноактном метаморфизме [Spear, 1989, 1993] (см. рис. 6, 10).

Дополнительными индикаторными признаками полиметаморфизма могут служить геохимические закономерности поведения главных и редких элементов в зональных гранатах и содержащихся в них минеральных включениях, сформированных при прогрессивном и регрессивном метаморфизме пелитов (рис. 11).

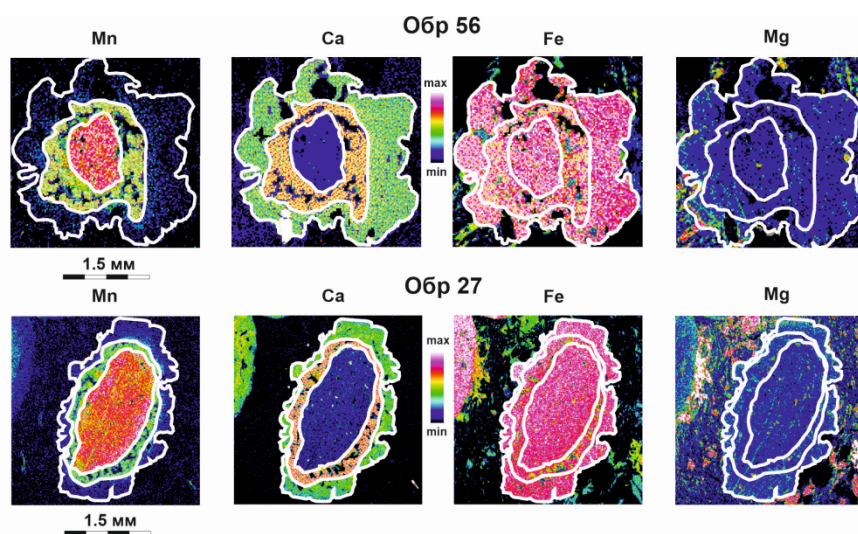


Рис. 10. Элементное картирование зональных зерен граната из обр. 56 (верхний ряд) и обр. 27 (нижний ряд)

Fig. 10. Typical element distribution maps of large zoned garnet grains from samples 56 and 27 in Garevka complex

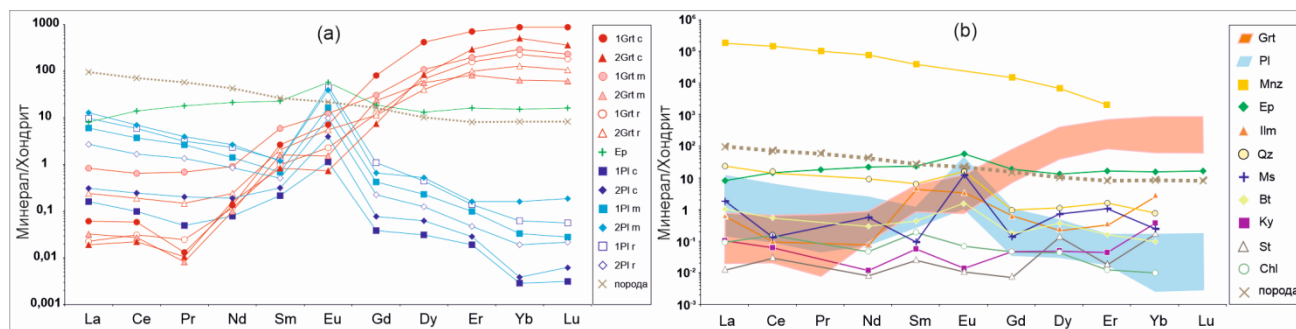


Рис. 11. Спектры распределения редкоземельных элементов в зональных гранатах и плагиоклазах (1 – обр. 56, 2 – обр. 27), эпидоте (а) и других минералах (б) – участниках реакций, нормированные к хондриту [Boynnton, 1984], в сравнении с микроэлементным составом породы (обр. 56)

Grt_c , Grt_m и Grt_r – составы ядра, средней зоны и каймы в зернах граната (а). Поля составов граната и плагиоклаза выделены красным и голубым цветом, соответственно (б)

Fig. 11. Chondrite-normalized REE patterns [Boynnton, 1984] of zoned garnet and plagioclase, and epidote (a) and of all minerals, which participate in collision-related metamorphic reactions (b) compared with the average REE pattern for study rocks. 1Grt and 1Pl, sample 56; 2Grt and 2Pl, sample 27

C, m, and r correspond to core, middle and rim garnet zones, respectively (a). Fields of garnet and plagioclase compositions is indicated by red and blue colours, respectively (b)

Как правило, рост температуры и давления сопровождается уменьшением концентрации Y и HREE в гранатах [Скублов, 2005]. Это подтверждается систематическими наблюдениями отрицательной корреляции между содержаниями CaO и HREE при формировании прогрессивной зональности в гранатах, испытавших наложенный метаморфизм, указывающими, что эти элементы, занимающие одну кристаллохимическую позицию, могут замещать друг друга при метаморфизме [van Westrenen et al., 2003].

Это обосновывается схожими величинами ионных радиусов HREE (1,01–1,05 Å) и Y (1,04 Å) с ионным радиусом Ca (1,04 Å) [Ague, Carlson, 2013]. В качестве преобладающего механизма для сохранения баланса заряда предполагается гетеровалентный изоморфизм по следующей схеме: $AREE^{3+} + BFe^{2+} = ACa^{2+} + BAl^{3+}$ [Carlson, 2012]. Эта реакция включает перекрестный катионный обмен Mg^{2+} или Fe^{2+} на Al^{3+} в октаэдрических позициях с одновременным катионным обменом REE^{3+} и Y на Ca^{2+} в позициях AO_8 -полиэдров с координационным числом, равным 8 [Likhanov, 2019].

Расчеты уравнений реакций, анализ баланса вещества и особенности изменения минерального состава при коллизионном метаморфизме изученных гнейсов показали изохимический характер процесса в отношении большинства компонентов системы [Likhanov, 2019]. Минимальный объем такой системы, в котором происходил взаимный обмен всеми химическими элементами и достигался полный баланс главных и редких элементов между реагирующими фазами, не превышал $\sim 1 \text{ мм}^3$. Наибольшей миграционной подвижностью в процессах метаморфизма обладают HREE, требующие больший объем для сохранения материального баланса (до 8 мм^3). Особенности распределения и более высокие масштабы массопереноса HREE контролируются их изоморфизмом с CaO в гранате [Лиханов, Ревердатто, 2016].

Полицикличность проявлений метаморфизма разных типов в Заангарье Енисейского кряжа, различающихся термодинамическими режимами и величинами метаморфических градиентов, подтверждается *in situ* U-Pb SHRIMP-II и ^{40}Ar - ^{39}Ar датировками (например, рис. 6). На первом этапе сформировались высокоградиентные зональные комплексы низких давлений *And-Sil* типа с гренвилевским возрастом $\sim 1\,050$ – 950 млн лет при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте $dT/dH = 25$ – 35°C/км [Лиханов и др., 2001]. На втором этапе эти породы подверглись неопротерозойскому (с двумя пиками – 854 – 862 и 798 – 802 млн лет) [Лиханов и др., 2011] коллизионному метаморфизму умеренных давлений *Ky-Sil* типа с локальным повышением давления вблизи надвигов, в результате чего происходило прогрессивное замещение $And \rightarrow Ky \pm Sil$ и обра-

зование новых минеральных ассоциаций и деформационных структур. Формирование более древних метаморфических комплексов *Ky-Sil* типа (маяконский, тейский и чапский участки) происходило в результате надвига на Енисейский кряж блоков пород со стороны Сибирского кратона на рубеже ~ 850 млн лет, что подтверждается геофизическими данными и результатами исследований природы и возраста источников сноса [Лиханов и др., 2014].

Поздний повторный коллизионный метаморфизм с возрастом ~ 800 млн лет обусловлен встречными движениями мелких блоков восточного направления в зоне оперяющих разломов более высокого порядка (гаревский, енисейский и тисский участки) в результате аккреционно-коллизионных событий вальгальской складчатости [Likhanov, Santosh, 2019]. Заключительный этап сопровождался синэксгумационным динамометаморфизмом (785 – 776 млн лет) с $dT/dH \leq 15^\circ \text{C/км}$, отражающим тектонические обстановки быстрого подъема блоков пород в сдвиговых зонах и зонах растяжения коры [Лиханов и др., 2013в].

Вблизи гранитоидных плутонов в гипабиссальных условиях (тейский и маяконский участки) локально проявлен наложенный термальный метаморфизм позднерифейского возраста в условиях высокого метаморфического градиента с $dT/dH > 100^\circ \text{C/км}$ [Likhanov et al., 2001]. Привнос дополнительного тепла со стороны Каламинского и Чиримбинского интрузивных массивов мог служить причиной появления $Fi \pm Sil$ ассоциации в метапелитах умеренных давлений, изначально не отвечающих *P-T* области стабильности фибrolита и силлиманита [Лиханов, 2003].

На заключительном этапе эволюции региона происходило постепенное существенное уменьшение общего давления метаморфизма почти на 3 – $4,8$ кбар при незначительном уменьшении температуры (не более 120°C), что согласуется с постепенным снижением концентрации гроссулярового компонента и одновременным увеличением содержания алмандинового минала (см. рис. 6, 10). Это, вероятно, свидетельствует о режиме декомпрессионного остывания пород при низком метаморфическом градиенте с $dT/dH \leq 15^\circ \text{C/км}$ и может быть объяснено быстрой эксгумацией высокометаморфизованных блоков пород одновременно с регрессивным низкотемпературным метаморфизмом [Reverdatto et al., 2019].

Принципиальные различия в направлении регрессивных ветвей метаморфизма разных участков, определяющих итоговую траекторию *P-T-t* трендов, контролируются, главным образом, механизмами эксгумации в различных геодинамических обстановках: эрозионной денудацией перекрывающих комплексов или тектонической транспортировкой при растяжении земной коры. Для большинства

пород тейского комплекса, образование которых связано с процессами коллизии плит, характерны P - T - t тренды с движением «по часовой стрелке». Декомпрессионное остывание пород гаревского комплекса с низким $dT/dH \leq 15$ °C/км с движением «против часовой стрелки» связывается с быстрой тектонической эксгумацией при растяжении и утонении коры, обеспечивающей резкий сброс давления не успевающей остыть среды. Это доказывается тем, что заключительные стадии развития коллизионного орогена в регионе маркируются дайковыми роями бимодальных ассоциаций анорогенных гранитоидов и внутриплитных базитов рифтогенной природы с возрастами внедрения 797–792 млн лет, связанными с неопротерозойскими процессами растяжения коры вдоль западной окраины Сибирского кратона и началом распада суперконтинента Родиния [Likhanov, Santosh, 2017].

Заключение

Изучены докембрийские геологические комплексы, приуроченные к линейным зонам смятия вдоль Приенисейской и Татарско-Ишимбинской систем разломов в Заангарье Енисейского кряжа. На примере тейского и гаревского метаморфических комплексов высокоглиноземистых метапелитов, характеризующихся присутствием трех полиморфов Al_2SiO_5 , приведены геолого-структурные, минералого-петрологические и изотопно-геохронологические свидетельства их полиметаморфической истории. Важнейшей особенностью изученных метаморфических комплексов является неоднородность метаморфизма по режиму давления, выраженная в проявлении прогрессивного регионального метаморфизма двух фациальных серий и синэксгумационного регрессивного метаморфизма.

На первом этапе сформировались высокоградиентные зональные комплексы низких давлений *And-Sil* типа с гренвилевским возрастом ~1050–950 млн лет при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте $dT/dH=25\text{--}35$ °C/км. На втором этапе эти породы подверглись неопротерозойскому коллизионному метаморфизму умеренных давлений *Ky-Sil* типа с локальным повышением давления вблизи надвигов при весьма низком градиенте $dT/dH = 7\text{--}14$ °C/км, в результате чего происходило прогрессивное замещение $And \rightarrow Ky \pm Sil$ и образование новых минеральных ассоциаций и деформационных структур.

Формирование более древних метаморфических комплексов *Ky-Sil* типа (маяконский, тейский и чапский участки) происходило в результате надвига на Енисейский кряж блоков пород со стороны Сибирского кратона на рубеже ~850 млн лет. Поздний повторный коллизионный метаморфизм с возрастом ~800 млн лет обусловлен встречными движениями

мелких блоков восточного направления в зоне оперяющих разломов более высокого порядка (полканский, гаревский, енисейский и тисский участки) в результате аккреционно-коллизионных событий вальгальской складчатости. В изученных ореолах наложение более поздних минеральных ассоциаций на ранние в ходе разных геодинамических событий четко фиксируется по реакционным структурам и химической зональности минералов, конфигурации P - T трендов и изотопным датировкам. Принципиальные различия в направлении регрессивных ветвей регионального метаморфизма, определяющих итоговую траекторию P - T - t трендов, контролируются, главным образом, механизмами эксгумации в различных геодинамических обстановках: эрозионной денудацией перекрывающих комплексов или тектонической транспортировкой при растяжении земной коры. Секущий характер наложенных изоград в изученных зональных ореолах, специфика распределения главных и редких химических элементов в зональных минералах, а также видимые различия в структурно-текстурных особенностях и P - T условиях формирования, величинах метаморфических градиентов и изотопных датировках разных типов метаморфизма свидетельствуют о последовательном росте полиморфов Al_2SiO_5 в результате сложной полиметаморфической истории, обусловленной сменой разных тектонических обстановок.

Во всех случаях минералы Al_2SiO_5 образовались в разное время и не могут считаться стабильными одновременно, хотя P - T тренды полиморфов могли проходить вблизи или непосредственно через «тройную точку». Полиметаморфический характер зональности для высокоглиноземистых метапелитов Енисейского кряжа хорошо согласуется с доказательствами последовательного роста полиморфов в аналогичных по составу породах Новой Англии [Florence et al., 1993; Spear et al., 2002].

В этих работах было продемонстрировано, что район Маунт Мусилок, ранее считавшийся эталонным примером одноактных зональных ореолов, являлся частью надвиговой структуры, где *And-Sil* породы низких давлений испытали *Ky-Sil* метаморфизм умеренных давлений вблизи разломов. Сравнительный анализ с другими классическими проявлениями в США и Европе, где исследовалась эволюция метаморфических комплексов с тремя алюмосиликатами [Grover et al., 1992; Carey et al., 1992; Daniel et al., 1992; Reche et al., 1998; Williams, Karlstrom, 1996; Whitney, 2002], позволяет заключить, что минеральная ассоциация «тройной точки» Al_2SiO_5 , в которой все три полиморфа находятся в стабильном равновесии, не устойчива в метапелитах любого химического состава. Эти минералы всегда находились в реакционных соотношениях, т.е. формировались разновременно. Это означает,

что использование таких ассоциаций для оценки *P-T* параметров метаморфизма и калибровки геотермомобарометров не совсем корректно и может являться причиной значительных ошибок.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-20018), с дополнительной поддержкой полевых работ в рамках госзадания ИГМ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Бабичев А.В., Ревердатто В.В., Полянский О.П., Лиханов И.И., Семенов А.Н. Теплогенерация за счет трения в сдвиговых зонах коры как фактор метаморфизма и анатексиса: результаты численного моделирования // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486, № 6. С. 704–708.
- Егоров А.С. Глубинное строение и геодинамика литосферы северной Евразии (по результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотраверсов России). СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. 199 с.
- Козлов П.С., Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Зиновьев С.В. Тектоно-метаморфическая эволюция гаревского полиметаморфического комплекса Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 11. С. 1476–1496.
- Козлов П.С., Филиппов Ю.Ф., Лиханов И.И., Ножкин А.Д. Геодинамическая модель эволюции Приенисейской палеосубдукционной зоны в неопротерозое (западная окраина Сибирского кратона), Россия // Геотектоника. 2020. Т. 54, № 1. С. 62–78.
- Коробейников С.Н., Полянский О.П., Лиханов И.И., Свердлова В.Г., Ревердатто В.В. Математическое моделирование надвига как причины формирования андалузит-кианитовой метаморфической зональности в Енисейском кряже // Доклады Академии наук. 2006. Т. 408, № 4. С. 512–516.
- Кориковский С.П. Фации метаморфизма метapelитов. М.: Наука, 1979. 263 с.
- Лепезин Г.Г., Каргополов С.А., Жираковский В.А. Минералы группы силлиманита как новое перспективное сырье для алюминиевой промышленности России // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 12. С. 1605–1617.
- Лиханов И.И. Минеральные реакции в высокоглиноземистых и железистых роговиках в связи с проблемой устойчивости редких минеральных парагенезисов контактового метаморфизма // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 4. С. 305–316.
- Лиханов И.И. Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // Петрология. 2020а. Т. 28, № 1. С. 4–22.
- Лиханов И.И. Неустойчивость парагенезисов «тройной точки» Al_2SiO_5 как следствие полиметаморфизма высокоглиноземистых метapelитов // Петрология. 2020б. Т. 28, № 6. С. 610–627.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В. Нижнепротерозойские метapelиты Енисейского кряжа: природа и возраст протолита, поведение вещества при коллизионном метаморфизме // Геохимия. 2011. Т. 49, № 3. С. 239–267.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В. Геохимия, возраст и особенности петрогенезиса пород гаревского метаморфического комплекса Енисейского кряжа // Геохимия. 2014а. Т. 52, № 1. С. 3–25.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В. P-T-t эволюция метаморфизма в Заангарье Енисейского кряжа: петрологические и геодинамические следствия // Геология и геофизика. 2014б. Т. 55, № 3. С. 385–416.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В. Количественный анализ массопереноса при полиметаморфизме метapelитов Заангарья Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 8. С. 1527–1547.
- Лиханов И.И., Полянский О.П., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Вершинин А.Е., Кребс М., Мемми И. Метаморфическая эволюция высокоглиноземистых метapelитов вблизи Панимбинского надвига (Енисейский кряж): минеральные ассоциации, P-T параметры и тектоническая модель // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 8. С. 1205–1220.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Селятицкий А.Ю. Минеральные равновесия и P-T диаграмма для железисто-глиноземистых метapelитов в системе KFMASH ($\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$) // Петрология. 2005. Т. 13, № 1. С. 81–92.
- Лиханов И.И., Козлов П.С., Попов Н.В., Ревердатто В.В., Вершинин А.Е. Коллизионный метаморфизм как результат надвигов в заангарской части Енисейского кряжа // Доклады Академии наук. 2006. Т. 411, № 2. С. 235–239.
- Лиханов И.И., Козлов П.С., Полянский О.П., Попов Н.В., Ревердатто В.В., Травин А.В., Вершинин А.Е. Неопротерозойский возраст коллизионного метаморфизма в Заангарье Енисейского кряжа (по $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ данным) // Доклады Академии наук. 2007. Т. 412, № 6. С. 799–803.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Вершинин А.Е. Железисто-глиноземистые метapelиты тейской серии Енисейского кряжа: геохимия, природа протолита и особенности поведения вещества при метаморфизме // Геохимия. 2008а. Т. 46, № 1. С. 20–41.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Попов Н.В. Коллизионный метаморфизм докембрийских комплексов в заангарской части Енисейского кряжа // Петрология. 2008б. Т. 16, № 2. С. 148–173.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Попов Н.В. Кинанит-силлиманитовый метаморфизм докембрийских комплексов Заангарья Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. С. 1335–1356.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С. Коллизионные метаморфические комплексы Енисейского кряжа: особенности эволюции, возрастные рубежи и скорость эксгумации // Геология и геофизика. 2011а. Т. 52, № 10. С. 1593–1611.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Вершинин А.Е. Тейский полиметаморфический комплекс в Заангарье Енисейского кряжа – пример совмещенной зональности фациальных серий низких и умеренных давлений // Доклады Академии наук. 2011б. Т. 436, № 4. С. 509–514.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С. U-Pb и $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ свидетельства гренвилльских событий на Енисейском кряже при формировании Тейского полиметаморфического комплекса // Геохимия. 2012. Т. 50, № 6. С. 607–614.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Хиллер В.В. Реконструкция неопротерозойской метаморфической истории Заангарья Енисейского кряжа по данным Th-U-Pb датирования монацита и ксенотима в зональных гранатах // Доклады Академии наук. 2013а. Т. 450, № 3. С. 329–334.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Зиновьев С.В. Неопротерозойский дайковый пояс Заангарья Енисейского кряжа как индикатор процессов растяжения и распада Родинии // Доклады Академии наук. 2013б. Т. 450, № 6. С. 685–690.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Хиллер В.В., Сухоруков В.П. Зональность граната как следствие трех метаморфических событий в докембрийской истории Заангарья Енисейского кряжа // Петрология. 2013в. Т. 21, № 6. С. 612–631.
- Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Ревердатто В.В., Козлов П.С. Гренвилльские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. 2014. Т. 48, № 5. С. 32–53.

- Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Ревердатто В.В., Крылов А.А., Козлов П.С., Хиллер В.В.** Метаморфическая эволюция ультравысокотемпературных железисто-глиноземистых гранулитов Южно-Енисейского кряжа и тектонические следствия // *Петрология*. 2016. Т. 24, № 4. С. 423–440.
- Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Савко К.А.** Аккреционная тектоника западной окраины Сибирского кратона // *Геотектоника*. 2018. Т. 52, № 1. С. 28–51.
- Лиханов И.И., Зиновьев С.В., Козлов П.С.** Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // *Геотектоника*. 2021. Т. 55, № 1. С. 41–65.
- Ножкин А.Д., Борисенко А.С., Неволько П.А.** Этапы позднепротерозойского магматизма и возрастные рубежи золотого оруденения Енисейского кряжа // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52, № 1. С. 158–181.
- Ножкин А.Д., Туркина О.М., Маслов А.В., Дмитриева Н.В., Ковач В.П., Ронкин Ю.Л.** Sm-Nd-изотопная систематика метapelитов докембрия Енисейского кряжа и вариации возраста источников сноса // *Доклады Академии наук*. 2008. Т. 423, № 6. С. 795–800.
- Ножкин А.Д., Дмитриева Н.В., Лиханов И.И., Серов П.А., Козлов П.С.** Геохимические и изотопно-геохронологические свидетельства субсинхронного островодужного магматизма и терригенной седиментации [Предивинский террейн Енисейского кряжа] // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57, № 11. С. 1992–2014.
- Ревердатто В.В., Лиханов И.И., Полянский О.П., Шеплев В.С., Колобов В.Ю.** Природа и модели метаморфизма. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 331 с.
- Склярёв Е.В.** Механизмы эксгумации метаморфических комплексов // *Геология и геофизика*. 2006. Т. 47, № 1. С. 71–75.
- Скублов С.Г.** Геохимия редкоземельных элементов в породообразующих метаморфических минералах. СПб.: Наука, 2005. 147 с.
- Ague J.J.** Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites // *Geology*. 1991. V. 19. P. 855–858.
- Ague J.J., Carlson W.D.** Metamorphism as garnet sees it: the kinetics of nucleation and growth, equilibration, and diffusional relaxation // *Elements*. 2013. V. 9. P. 439–445.
- Beddoe-Stephens B.** Pressures and temperatures of Dalradian metamorphism and the andalusite-kyanite transformation in the northeast Grampians // *Scottish J. Geol.* 1990. V. 26. P. 3–14.
- Bestel M., Gawronski T., Abart R., Rhede D.** Compositional zoning of garnet porphyroblasts from the polymetamorphic Wölz Complex, Eastern Alps // *Mineralogy and Petrology*. 2009. V. 97. P. 173–188.
- Carey J.W., Rice J.M., Grover T.W.** Petrology of aluminous schist in the Boehls Butte region of Northern Idaho: Geologic history and aluminosilicate phase relations // *American Journal of Science*. 1992. V. 292. P. 455–473.
- Carlson W.D.** Rates and mechanism of Y, REE, and Cr diffusion in garnet // *American Mineralogist*. 2012. 97. P. 1598–1618.
- Chatterjee N.D., Johannes W.S.** Thermal stability and standard thermodynamic properties of synthetic 2M₁-muscovite, KAl₂Al₃Si₃O₁₀(OH)₂ // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1974. V. 48. P. 89–114.
- Corsini M., Bosse V., Feraud G.** Exhumation processes during post-collisional stage in the Variscan belt revealed by detailed ⁴⁰Ar/³⁹Ar study (Tanneron Massif, SE France) // *International Journal of Earth Sciences*. 2010. V. 99. P. 327–341.
- Cutts K.A., Kinny P.D., Strachan R.A., Hand M., Kelsey D.E., Emery M., Friend C.R.L., Leslie A.G.** Three metamorphic events recorded in a single garnet: Integrated phase modelling, in situ LA-ICPMS and SIMS geochronology from the Moine Supergroup, NW Scotland // *Journal of Metamorphic Geology*. 2010. V. 28. P. 249–267.
- Daniel C.G., Thompson A.G., Grambling J.A.** Decompressional metamorphic P-T paths from kyanite-sillimanite-andalusite bearing rocks in North-Central New Mexico // *Geological Society of America Annual Meeting—Abstracts with Program*. 1992. V. 24. P. A264.
- Faryad S.W., Chakraborty S.** Duration of Eo-Alpine metamorphic events obtained from multicomponent diffusion modeling of garnet: a case study from the Eastern Alps // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2005. V. 150. P. 306–318.
- Florence F.P., Spear F.S., Kohn M.J.** P-T paths from northwestern New Hampshire: Metamorphic evidence for stacking in a thrust/nappe complex // *American Journal of Science*. 1993. V. 293. P. 937–979.
- Gaides F., De Capitani C., Abart R., Schuster R.** Prograde garnet growth along complex P–T–t paths: results from numerical experiments on polyphase garnet from the Wölz complex (Austroalpine basement) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2008. V. 155. P. 673–688.
- Grover T.W., Rice J.M., Carey J.W.** Petrology of aluminous schists in the Boehls Butte region of Northern Idaho: Phase equilibria and P-T evolution // *American Journal of Science*. 1992. V. 292. P. 474–507.
- Haas H., Holdaway M.J.** Equilibria in the system Al₂O₃-SiO₂-H₂O involving the stability limits of pyrophyllite, and thermodynamic data of pyrophyllite // *American Journal of Sciences*. 1973. V. 273. P. 348–357.
- Hietanen A.** On the facies series in various types of metamorphism // *Journal of Geology*. 1967. V. 75. P. 187–214.
- Holdaway M.J.** Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram // *American Journal of Sciences*. 1971. V. 271. P. 97–131.
- Kerrick D.M.** The Al₂SiO₅ polymorphs // *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*. 1990. V. 22. P. 406.
- Kohn M.J., Orange D.L., Spear F.S., Rumble D.III, Harrison T.M.** Pressure, temperature, and structural evolution of west-central New Hampshire: hot thrusts over cold basement // *Journal of Petrology*. 1992. V. 33. P. 521–556.
- Kozlov P.S.** Metamorphism, P-T-t conditions of formation, and prospects for the practical use of Al₂O₅ polymorphs, chloritoid, and staurolite [Yenisei Ridge] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. V. 110. P. 012010.
- Le Breton N., Thompson A.B.** Fluid-absent [dehydration] melting of biotite in metapelites in the early stages of crustal anatexis // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1988. V. 99. P. 226–237.
- Leech M.L., Stockli D.F.** The late exhumation history of the ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, south Ural Mountains, from new apatite fission track data // *Tectonics*. 2000. V. 19. P. 153–167.
- Likhanov I.I.** Chloritoid, staurolite and gedrite of the high-alumina hornfelses of the Karatash pluton // *International Geology Review*. 1988. V. 30. P. 868–877.
- Likhanov I.I.** Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia // *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts* // *Geological Society. London, Special Publications*, 2019. V. 478. P. 98–115.

- Likhanov I.I., Reverdatto V.V.** Provenance of Precambrian Fe- and Al-rich metapelites in the Yenisey Ridge and Kuznetsk Alatau, Siberia: geochemical signatures // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. 2007. V. 81. P. 409–423.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V.** Precambrian Fe- and Al-rich pelites from the Yenisey Ridge, Siberia: geochemical signatures for protolith origin and evolution during metamorphism // *International Geology Review*. 2008. V. 50. P. 597–623.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V.** Neoproterozoic collisional metamorphism in overthrust terranes of the Transangarian Yenisey Ridge, Siberia // *International Geology Review*. 2011. V. 53. P. 802–845.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Sheplev V.S., Vershinin A.E., Kozlov P.S.** Contact metamorphism of Fe- and Al-rich graphitic metapelites in the Transangarian region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia, Russia // *Lithos*. 2001. V. 58. P. 55–80.
- Likhanov I.I., Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Memmi I.** Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia // *Journal of Metamorphic Geology*. 2004. V. 22. P. 743–762.
- Likhanov I.I., Santosh M.** Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent // *Precambrian Research*. 2017. V. 300. P. 315–331.
- Likhanov I.I., Santosh M.** A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // *Precambrian Research*. 2019. V. 328. P. 128–145.
- Likhanov I.I., Santosh M.** The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited // *Geological Journal*. 2020. V. 55 (6). P. 4772–4789.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Khiller V.V., Sukhorukov V.P.** P-T-t constraints on polymetamorphic complexes of the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 113 (1). P. 391–410.
- Likhanov I.I., Régnier J.-L., Santosh M.** Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // *Lithos*. 2018. V. 304–307. P. 468–488.
- Pattison D.R.M.** Stability of andalusite and sillimanite and the Al_2SiO_5 triple point: constraints from the Ballachulish aureole // *Scottish Journal of Geology*. 1992. V. 100. P. 423–446.
- Pattison D.R.M.** Instability of Al_2SiO_5 “triple point” assemblages in muscovite+biotite+quartz-bearing metapelites, with implications // *American Mineralogist*. 2001. V. 86. P. 1414–1422.
- Reche J., Martinez F.J., Arboleya M.L., Dietsch C., Briggs W.D.** Evolution of a kyanite-bearing belt within a HT-LP orogen: the case of the NW Variscan Iberia // *Journal of Metamorphic Geology*. 1998. V. 16. P. 379–394.
- Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Y.** The Nature and Models of Metamorphism. Cham : Springer, 2019. 330 p.
- Shaw D.M.** Geochemistry of pelitic rocks. Part III: Major elements and general geochemistry // *Geological Society of America Bulletin*. 1956. V. 67. P. 913–934.
- Spear F.S.** Relative thermobarometry and metamorphic P-T paths // *Evolution of Metamorphic Belts* / eds. by J.S. Daly, R.A. Cliff, B.W.D. Yardley // *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 1989. V. 43. P. 63–82.
- Spear F.S.** Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths // *Mineralogical Society of America*. Washington, D.C., 1993. 799 p.
- Spear F.S., Kohn M.J., Cheney J.T., Florence F.** Metamorphic, thermal, and tectonic evolution of central New England // *Journal of Petrology*. 2002. V. 43. P. 2097–2120.
- Spear F.S., Hickmott D.D., Selverstone J.** Metamorphic consequences of thrust emplacement, Fall Mountain, New Hampshire // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1990. V. 102. P. 1344–1360.
- Symmes G.H., Ferry J.M.** The effect of whole-rock MnO content on the stability of garnet in pelitic schists during metamorphism // *Journal of Metamorphic Geology*. 1992. V. 10. P. 221–237.
- Thompson J.B., Jr.** The graphical analysis of mineral assemblages in pelitic schists // *American Mineralogist*. 1957. V. 42. P. 842–858.
- van Westrenen W., Allan N.L., Blundy J.D., Lavrentiev M.Y., Lucas B., Purton J.A.** Trace element incorporation into pyrope-grossular solid solutions: an atomistic simulation study // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2003. V. 30. P. 217–229.
- Whitney D.L.** Coexisting andalusite, kyanite, and sillimanite: sequential formation of three Al_2SiO_5 polymorphs during progressive metamorphism near the triple point, Sivrihisar, Turkey // *American Mineralogist*. 2002. V. 87. P. 405–416.
- Whitney D.L., Evans B.W.** Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. 2010. V. 95. P. 185–187.
- Williams M.L., Karlstrom K.E.** Looping P-T paths and high-T, low-P middle crustal metamorphism: Proterozoic evolution of the southwestern United States // *Geology*. 1996. V. 24. P. 1119–1122.

Авторы:

Лиханов Игорь Иванович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория метаморфизма и метасоматоза, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: likh@igm.nsc.ru

Ревдатов Владимир Викторович, академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, лаборатория метаморфизма и метасоматоза, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: rever@igm.nsc.ru

Geosphere Research, 2021, 3, 19–41. DOI: 10.17223/25421379/20/2

I.I. Likhanov, V.V. Reverdatto

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

EVIDENCE FOR POLYMETAMORPHIC EVOLUTION OF THE PRECAMBRIAN GEOLOGICAL COMPLEXES OF THE TRANSANGARIAN YENISEI RIDGE

Metapelites of highly aluminous bulk compositions, containing all three Al_2SiO_5 minerals, from Teya and Garevka complexes in the Transangarian region of the Yenisei Ridge (the western margin of the Siberian craton) were studied to determine their metamorphic evolution and elucidate distinctive features of regional geodynamic processes. Here we present geological, structural, mineralogical, petrological, and isotopic-geochronological evidence of their polymetamorphic history and employ *P-T-t* constraints on the development

of these complexes to argue that the Al_2SiO_5 triple-point assemblages, in which all three Al_2SiO_5 minerals are in stable equilibrium, are not possible. In recent years, andalusite, kyanite, and sillimanite, which are constituents of high-alumina schists, have become increasingly important in practical terms for the production of aluminum oxide, silumin, and aluminum for the expansion of the raw material base in industry. The studied metamorphic complexes are heterogeneous in pressure, which is expressed in the manifestation of prograde regional metamorphism of two facies series and retrograde synexhumation metamorphism. The first stage occurred as a result of the Grenville-age orogeny during late Meso-early Neoproterozoic (1 050–850 Ma) and was marked by low-pressure zoned metamorphism of the And-Sil type with a metamorphic field gradient of $dT/dH = 25\text{--}35^\circ\text{C/km}$ typical of orogenic belts. At the second stage, the rocks experienced middle Neoproterozoic (801–793 Ma) collision-related medium-pressure metamorphism with a local pressure increase near the thrust faults and only minor heating, suggesting a low gradient of $dT/dH = 7\text{--}14^\circ\text{C/km}$ as a result of which the progressive replacement of $\text{And} \rightarrow \text{Ky} \pm \text{Sil}$ and the formation of new mineral associations and deformation structures. The final stage evolved as a synexhumation retrograde metamorphism (785–776 Ma) with $dT/dH \leq 15^\circ\text{C/km}$ and recorded uplift of the rocks to upper crustal levels in shear zones. Principle differences in the direction of retrograde segments determining the summary trajectory of P - T - t paths are mainly controlled by mechanisms of exhumation in different geodynamic settings. Most rocks of the Teya Complex are characterized by clockwise P - T - t paths, while decompression cooling of the rocks of the Garevka Complex with counterclockwise movement is related to the rapid tectonic exhumation during extension and thinning of crust, which provide a sharp pressure drop in a still uncooled medium. Reaction microtextures, chemical zoning in minerals, radiometric dating as well as the P - T trajectories of these rocks provide evidence for the polymetamorphic history of the aluminosilicate triple-point assemblages (containing all three Al_2SiO_5 minerals). The metapelites with highly aluminous bulk compositions in the Yenisei Ridge record overprinting of early mineral assemblages during subsequent thermal events. The triple-point positions reported in earlier studies resulted from polymetamorphism (asynchronous growth of the polymorphs), when all aluminium-silicate minerals grew at different times in the metamorphic history of the rock and hence cannot be regarded as true triple-point parageneses. The occurrence of all three Al_2SiO_5 minerals in individual rocks was interpreted to be due to reaction relations with microtextural evidence of one polymorph replacing another. We illustrate that the aluminum silicate triple-point assemblages, in which all three Al_2SiO_5 minerals are in stable equilibrium, are not possible in metapelitic rocks of wide range of chemical composition. Hence such purported triple-point assemblages cannot represent a stable association and cannot be used to calibrate or test geothermobarometers.

Keywords: P - T paths of metamorphic evolution, tectonic settings, Al-rich metapelites, Al_2SiO_5 minerals, Yenisei Ridge

References

- Babichev A.V., Reverdatto V.V., Polyansky O.P., Likhanov I.I., Semenov A.N. Heat generation due to friction in the shear crust zones as a factor of metamorphism and anataxis: the results of numerical simulation // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 486. No 2. pp. 706–710.
- Egorov A.S. *Glubinnoe stroenie i geodinamika litosferi severnoy Evrazii (po rezul'tatam geologo-geofizicheskogo modelirovaniya vdol' geotraverson Rossii)* [Deep-seated structure and geodynamics of the lithosphere of Northern Eurasia: evidence from geological-geophysical modeling along the geotraverses of Russia]. St. Petersburg: VSEGEI, 2004. 199 p. In Russian
- Kozlov P.S., Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Zinov'ev S.V. Tectonometamorphic evolution of the Garevka polymetamorphic complex (Yenisei Ridge) // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. V. 53. No 11. pp. 1133–1149.
- Kozlov P.S., Filippov Yu.F., Likhanov I.I., Nozhkin A.D. Geodynamic model of the Neoproterozoic evolution of the Yenisei paleosubduction zone (western margin of the Siberian Craton), Russia // *Geotectonics*. 2020. V. 54. No 1. pp. 54–67.
- Korobeinikov S.N., Polyansky O.P., Likhanov I.I., Sverdlova V.G., Reverdatto V.V. Mathematical modeling of overthrusting fault as a cause of andalusite-kyanite metamorphic zoning in the Yenisei Ridge // *Doklady Earth Sciences*. 2006. V. 408. No 1. pp. 652–656.
- Korikovskii S.P. *Facii metamorfizma metapelitov* [Metamorphic facies of metapelites]. Moscow: Publishing house "Nauka". 1979. 263 p. In Russian
- Lepezin G.G., Kargopolov S.A., Zhirakovskii V.Yu. Sillimanite group minerals: a new promising raw material for the Russian aluminum-producing industry // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. V. 51. No 12. pp. 1247–1256.
- Likhanov I.I. Mineral reactions in high-alumina feriferous metapelitic hornfelses in connection with the problem of stability of rare parageneses of contact metamorphism // *Geologiya i Geofizika*. 2003. V. 44. No 4. pp. 305–316.
- Likhanov I.I. Metamorphic indicators for collision, extension and shear zones geodynamic settings of the Earth's crust // *Petrology*. 2020. V. 28. No 1. pp. 1–16. In Russian
- Likhanov I.I. Instability of Al_2SiO_5 "triple point" assemblages as a consequence of polymetamorphism in Al-rich metapelites // *Petrology*. 2020. V. 28. No 6. pp. 532–548.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. Lower Proterozoic metapelites in the northern Yenisei Range: nature and age of protolith and the behaviour of material during collisional metamorphism // *Geochemistry International*. 2011. V. 49. No 3. pp. 224–252.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. Geochemistry, age and petrogenesis of rocks from the Garevka metamorphic complex, Yenisey Ridge // *Geochemistry International*. 2014a. V. 52. No 1. pp. 1–21.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. P - T - t constraints on the metamorphic evolution of the Transangarian Yenisei Ridge: geodynamic and petrological implications // *Russian Geology and Geophysics*. 2014b. V. 55. No 3. pp. 299–322.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. Quantitative analysis of mass-transfer during polymetamorphism in pelites of the Transangarian Yenisei Ridge // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. V. 57. No 8. pp. 1204–1220.
- Likhanov I. I., Polyanskii O. P., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Vershinin A. E., Krebs M., Memmi I. Metamorphic evolution of high-alumina metapelites near the Panimba overthrust (Yenisei Range): mineral associations, P - T conditions, and tectonic model // *Geologiya i Geofizika*. 2001. V. 4. No 8. pp. 1205–1220.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Selyatizkii A.Y. Mineral equilibria and P - T diagram for Fe- and Al-rich metapelites in the KFMASH system (K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O) // *Petrology*. 2005. V. 13. No 1. pp. 73–83.
- Likhanov I.I., Kozlov P.S., Popov N.V., Reverdatto V.V., Vershinin A.E. Collision metamorphism as a result of thrusting in the Transangara region of the Yenisei Ridge // *Doklady Earth Sciences*. 2006. V. 411. No 1. pp. 1313–1317.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S. U-Pb and ^{40}Ar - ^{39}Ar evidence for Grenvillian activity in the Yenisey Ridge during formation of the Teya metamorphic complex // *Geochemistry International*. 2012. V. 50. No 6. pp. 551–557.

- Likhanov I.I., Kozlov P.S., Polyansky O.P., Popov N.V., Reverdatto V.V., Travin A.V., Vershinin A.E. Neoproterozoic age of collisional metamorphism in the Transangarian Yenisey Ridge: based on ^{40}Ar - ^{39}Ar data // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 413. No 1. pp. 234–237.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Vershinin A.E. Fe- and Al-rich metapelites of the Teya sequence, Yenisei Range: geochemistry, protoliths and the behavior of their matter during metamorphism // *Geochemistry International*. 2008a. V. 46. No 1. pp. 17–36.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Popov N.V. Collision metamorphism of Precambrian complexes in the Transangarian Yenisei Range // *Petrology*. 2008b. V. 16. No 2. pp. 136–160.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Popov N.V. Kyanite-sillimanite metamorphism of the Precambrian complexes, Transangarian region of the Yenisei Ridge // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. V. 50. No 12. pp. 1034–1051.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S. Collision-related metamorphic complexes of the Yenisei Ridge: their evolution, ages, and exhumation rate // *Russian Geology and Geophysics*. 2011a. V. 52. No 10. pp. 1256–1269.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Vershinin A.E. The Teya polymetamorphic complex in the Transangarian Yenisei Ridge: an example of metamorphic superimposed zoning of low- and medium-pressure facies series // *Doklady Earth Sciences*. 2011b. V. 436. No 2. pp. 213–218.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Khiller V.V. Neoproterozoic metamorphic evolution in the Transangarian Yenisei Ridge: evidence from monazite and xenotime geochronology // *Doklady Earth Sciences*. 2013a. V. 450. No 1. pp. 556–561.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Zinov'ev S.V. The Neoproterozoic Trans-Angara dike belt, Yenisei Range, as an indicator of extension and breakup of Rodinia // *Doklady Earth Sciences*. 2013b. V. 450. No 2. pp. 613–617.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Khiller V.V., Sukhorukov V.P. Three metamorphic events in Precambrian P-T-t history of the Transangarian Yenisey Ridge recorded in garnet grains in metapelites // *Petrology*. 2013c. V. 21. No 6. pp. 561–578.
- Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V., Kozlov P.S. Grenville tectonic events and evolution of the Yenisei Ridge at the western margin of the Siberian craton // *Geotectonics*. 2014. V. 48. No 5. pp. 371–389.
- Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V., Krylov A.A., Kozlov P.S., Khiller V.V. Metamorphic evolution of ultrahigh-temperature Fe- and Al-rich granulites in the South Yenisei Ridge and tectonic implications // *Petrology*. 2016. V. 24. No 4. pp. 392–408.
- Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Savko K.A. Accretionary tectonics of rock complexes in the western margin of the Siberian Craton // *Geotectonics*. 2018. V. 52. No 1. pp. 22–44.
- Likhanov I.I., Kozlov P.S., Zinov'ev S.V. Blastomylonite complexes of the western Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia): geological position, metamorphic evolution, and geodynamic models // *Geotectonics*. 2021. V. 55. No 1. pp. 36–57.
- Nozhkin A.D., Borisenko A.S., Nevolko P.A. Stages of Late Proterozoic magmatism and periods of Au mineralization in the Yenisey Ridge // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. V. 52. No 1. pp. 124–143.
- Nozhkin A.D., Turkina O.M., Dmitrieva N.V., Kovach V.P., Maslov A.V., Ronkin Y.L. Sm-Nd isotopic systematics of Precambrian metapelites from the Yenisei Range and age variations of their provenances // *Doklady Earth Sciences*. 2008. V. 423. No 2. pp. 1495–1500.
- Nozhkin A.D., Dmitrieva N.V., Likhanov I.I., Serov P.A., Kozlov P.S. Geochemical, isotopic and geochronological evidence for sub-synchronous island-arc magmatism and terrigenous sedimentation (Predivinsk terrane of the Yenisey Ridge) // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. V. 57. No 11. pp. 1570–1590.
- Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Y. *Priroda i modeli metamorfizma* [The Nature and Models of Metamorphism]. Novosibirsk: Publishing house "SB RAS". 2017. 331 p. In Russian.
- Sklyarov E.V. Exhumation of the metamorphic complexes: basic mechanisms // *Russian Geology and Geophysics*. 2006. V. 47. No 1. pp. 68–73.
- Skublov S.G. *Geokhimiya redkozemel'nykh elementov v porodoobrazuyuschikh metamorficheskikh mineralakh* [Geochemistry of rare-earth elements in the rock-forming metamorphic minerals]. St. Petersburg: Publishing house "Nauka", 2005. 147 p. In Russian.
- Ague J.J. Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites // *Geology*. 1991. V. 19. pp. 855–858.
- Ague J.J., Carlson W.D. Metamorphism as garnet sees it: the kinetics of nucleation and growth, equilibration, and diffusional relaxation. *Elements*. 2013. V. 9. pp. 439–445.
- Beddoe-Stephens B. Pressures and temperatures of Dalradian metamorphism and the andalusite-kyanite transformation in the north-east Grampians // *Scottish J. Geol.* 1990. V. 26. pp. 3–14.
- Bestel M., Gawronski T., Abart R., Rhede D. Compositional zoning of garnet porphyroblasts from the polymetamorphic Wölz Complex, Eastern Alps // *Mineralogy and Petrology*. 2009. V. 97. pp. 173–188.
- Carey J.W., Rice J.M., Grover T.W. Petrology of aluminous schist in the Boehls Butte region of Northern Idaho: Geologic history and aluminosilicate phase relations // *American Journal of Science*. 1992. V. 292. pp. 455–473.
- Carlson W.D. Rates and mechanism of Y, REE, and Cr diffusion in garnet // *American Mineralogist*. 2012. 97, pp. 1598–1618.
- Chatterjee N.D., Johannes W.S. Thermal stability and standard thermodynamic properties of synthetic 2M_1 -muscovite, $\text{KAl}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1974. V. 48. pp. 89–114.
- Corsini M., Bosse V., Feraud G. Exhumation processes during post-collisional stage in the Variscan belt revealed by detailed $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ study (Tanneron Massif, SE France) // *International Journal of Earth Sciences*. 2010. V. 99. pp. 327–341.
- Cutts K.A., Kinny P.D., Strachan R.A., Hand M., Kelsey D.E., Emery M., Friend C.R.L., Leslie A.G. Three metamorphic events recorded in a single garnet: Integrated phase modelling, in situ LA-ICPMS and SIMS geochronology from the Moine Supergroup, NW Scotland // *Journal of Metamorphic Geology*. 2010. V. 28. pp. 249–267.
- Daniel C.G., Thompson A.G., Grambling J.A. Decompressional metamorphic P-T paths from kyanite-sillimanite-andalusite bearing rocks in North-Central New Mexico // *Geological Society of America Annual Meeting—Abstracts with Program*. 1992. V. 24. p. A264.
- Faryad S.W., Chakraborty S. Duration of Eo-Alpine metamorphic events obtained from multicomponent diffusion modeling of garnet: a case study from the Eastern Alps // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2005. V. 150. pp. 306–318.
- Florence F.P., Spear F.S., Kohn M.J. P-T paths from northwestern New Hampshire: Metamorphic evidence for stacking in a thrust/nappe complex // *American Journal of Science*. 1993. V. 293. pp. 937–979.

- Gaides F., De Capitani C., Abart R., Schuster R. Prograde garnet growth along complex P–T–t paths: results from numerical experiments on polyphase garnet from the Wolz complex [Austroalpine basement] // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2008. V. 155. pp. 673–688.
- Grover T.W., Rice J.M., Carey J.W. Petrology of aluminous schists in the Boehls Butte region of Northern Idaho: Phase equilibria and P–T evolution // *American Journal of Science*. 1992. V. 292. pp. 474–507.
- Haas H., Holdaway M.J. Equilibria in the system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$ involving the stability limits of pyrophyllite, and thermodynamic data of pyrophyllite // *American Journal of Sciences*. 1973. V. 273. pp. 348–357.
- Hietanen A. On the facies series in various types of metamorphism // *Journal of Geology*. 1967. V. 75. pp. 187–214.
- Holdaway M.J. Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram // *American Journal of Sciences*. 1971. V. 271. pp. 97–131.
- Kerrick D.M. The Al_2SiO_5 polymorphs / Mineralogical Society of America. *Reviews in Mineralogy*. 1990. V. 22. p. 406.
- Kohn M.J., Orange D.L., Spear F.S., Rumble D. III, Harrison T.M. Pressure, temperature, and structural evolution of west-central New Hampshire: hot thrusts over cold basement // *Journal of Petrology*. 1992. V. 33. pp. 521–556.
- Kozlov P.S. Metamorphism, P–T–t conditions of formation, and prospects for the practical use of Al_2O_5 polymorphs, chloritoid, and staurolite [Yenisei Ridge] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. V. 110. pp. 012010.
- Le Breton N., Thompson A.B. Fluid-absent [dehydration] melting of biotite in metapelites in the early stages of crustal anatexis // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1988. V. 99. pp. 226–237.
- Leech M.L., Stockli D.F. The late exhumation history of the ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, south Ural Mountains, from new apatite fission track data // *Tectonics*. 2000. V. 19. pp. 153–167.
- Likhanov I.I. Chloritoid, staurolite and gedrite of the high-alumina hornfelses of the Karatash pluton // *International Geology Review*. 1988. V. 30. pp. 868–877.
- Likhanov I.I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. In: Ferrero, S., Lanari P., Gonsalves P. & Grosch E.G. (eds) *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts* // Geological Society, London, Special Publications, 2019. V. 478. pp. 98–115.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. Provenance of Precambrian Fe- and Al-rich metapelites in the Yenisey Ridge and Kuznetsk Alatau, Siberia: geochemical signatures // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. 2007. V. 81. pp. 409–423.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. Precambrian Fe- and Al-rich pelites from the Yenisey Ridge, Siberia: geochemical signatures for protholith origin and evolution during metamorphism // *International Geology Review*. 2008. V. 50. pp. 597–623.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. Neoproterozoic collisional metamorphism in overthrust terranes of the Transangarian Yenisey Ridge, Siberia // *International Geology Review*. 2011. V. 53. pp. 802–845.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Sheplev V.S., Vershinin A.E., Kozlov P.S. Contact metamorphism of Fe- and Al-rich graphitic metapelites in the Transangarian region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia, Russia // *Lithos*. 2001. V. 58. pp. 55–80.
- Likhanov I.I., Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia // *Journal of Metamorphic Geology*. 2004. V. 22. pp. 743–762.
- Likhanov I.I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent // *Precambrian Research*. 2017. V. 300. pp. 315–331.
- Likhanov I.I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // *Precambrian Research*. 2019. V. 328. pp. 128–145.
- Likhanov I.I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited // *Geological Journal*. 2020. V. 55 (6). pp. 4772–4789.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Khiller V.V., Sukhorukov V.P. P–T–t constraints on polymetamorphic complexes of the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 113(1). pp. 391–410.
- Likhanov I.I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // *Lithos*. 2018. V. 304–307. pp. 468–488.
- Pattison D.R.M. Stability of andalusite and sillimanite and the Al_2SiO_5 triple point: constraints from the Ballachulish aureole // *Scottish Journal of Geology*. 1992. V. 100. pp. 423–446.
- Pattison D.R.M. Instability of Al_2SiO_5 “triple point” assemblages in muscovite + biotite + quartz-bearing metapelites, with implications // *American Mineralogist*. 2001. V. 86. pp. 1414–1422.
- Reche J., Martinez F.J., Arboleya M.L., Dietsch C., Briggs W.D. Evolution of a kyanite-bearing belt within a HT–LP orogen: the case of the NW Variscan Iberia // *Journal of Metamorphic Geology*. 1998. V. 16. pp. 379–394.
- Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Y. *The Nature and Models of Metamorphism*. Cham: Springer. 2019. 330 p.
- Shaw D.M. Geochemistry of pelitic rocks. Part III: Major elements and general geochemistry // *Geological Society of America Bulletin*. 1956. V. 67. pp. 913–934.
- Spear F.S. Relative thermobarometry and metamorphic P–T paths // *Evolution of Metamorphic Belts* / Eds. Daly J.S., Cliff R.A., Yardley B.W.D. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 43. 1989. pp. 63–82.
- Spear F.S. Metamorphic phase equilibria and pressure–temperature–time paths // *Mineralogical Society of America, Washington, D.C.* 1993. 799 p.
- Spear F.S., Kohn M.J., Cheney J.T., Florence F. Metamorphic, thermal, and tectonic evolution of central New England // *Journal of Petrology*. 2002. V. 43. pp. 2097–2120.
- Spear F.S., Hickmott D.D., Selverstone J. Metamorphic consequences of thrust emplacement, Fall Mountain, New Hampshire // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1990. V. 102. pp. 1344–1360.
- Symmes G.H., Ferry J.M. The effect of whole-rock MnO content on the stability of garnet in pelitic schists during metamorphism // *Journal of Metamorphic Geology*. 1992. V. 10. pp. 221–237.
- Thompson J.B., Jr. The graphical analysis of mineral assemblages in pelitic schists // *American Mineralogist*. 1957. V. 42. pp. 842–858.

Van Westrenen W., Allan N.L., Blundy J.D., Lavrentiev M.Y., Lucas B., Purton J.A. Trace element incorporation into pyrope-grossular solid solutions: an atomistic simulation study // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2003. V. 30. pp. 217–229.

Whitney D.L. Coexisting andalusite, kyanite, and sillimanite: sequential formation of three Al_2SiO_5 polymorphs during progressive metamorphism near the triple point, Sivrihisar, Turkey // *American Mineralogist*. 2002. V. 87. pp. 405–416.

Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. 2010. V. 95. pp. 185–187.

Williams M.L., Karlstrom K.E. Looping P-T paths and high-T, low-P middle crustal metamorphism: Proterozoic evolution of the southwestern United States // *Geology*. 1996. V. 24. pp. 1119–1122.

Author's:

Likhanov Igor I., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Principal Research Fellow, Laboratory of metamorphism and metasomatism, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: likh@igm.nsc.ru

Reverdatto Vladimir V., Academician RAS, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Principal Research Fellow, Laboratory of metamorphism and metasomatism, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: rever@igm.nsc.ru