

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Научная статья

УДК 551.251

doi: 10.17223/25421379/25/1

ОСОБЕННОСТИ ПЕТРОГЕНЕЗИСА, ГЕОРЕСУРСЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ПОРОД СЕВЕРО-ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)



Павел Сергеевич Козлов¹, Игорь Иванович Лиханов²,
Владимир Викторович Ревердатто³, Василий Петрович Сухоруков⁴

¹ Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^{2, 3, 4} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

¹ kozlov@igg.uran.ru

² likh@igm.nsc.ru

³ rever@igm.nsc.ru

⁴ svp@igm.nsc.ru

Аннотация. Обоснованы геолого-структурные, минералого-петрологические и изотопно-геохронологические свидетельства полиметаморфической истории высокоглиноземистых метapelитов Заангарья Енисейского кряжа. В Тейском комплексе установлены площади развития метapelитов регионального метаморфизма низких давлений, в пределах которых сосредоточены перспективные Панибинское андалузитовое и Тейское силлиманитовое месторождения. Продукты наложенного кианит-силлиманитового типа метаморфизма образуют ряд биминеральных (Маяконское, Чиримбинское и др.) и полиминеральных (Вороговское, Ведугинское и др.) рудопроявлений. Анализ ресурсной базы полезных ископаемых региона показывает, что здесь открыт ряд перспективных объектов высокоглиноземистого сырья (ВГС), образование которых генетически связано с тектоно-метаморфическими процессами гренвилльской и байкальской орогении. Слагающие их минералы группы силлиманита, а также другие источники ВГС, содержащие ставролит и хлоритоид, обладают достаточными ресурсами для использования в промышленности совместно с разведанными месторождениями бокситов, глиноземистых железных руд и нефелиновых сиенитов.

Ключевые слова: *P–T–t эволюция метаморфизма, высокоглиноземистые метapelиты, полиморфы Al_2SiO_5 , бокситы, глиноземистые железные и нефелиновые руды, Енисейский кряж*

Благодарности: статья посвящается светлой памяти недавно ушедшего из жизни заслуженного геолога России, профессора Геннадия Григорьевича Лепезина, который на протяжении многих лет занимался исследованием метаморфизма и обоснованием вовлечения высокоглиноземистых минералов группы силлиманита Восточной Сибири в металлургическое производство России.

Источник финансирования: работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-20018) с дополнительной поддержкой полевых работ в рамках госзадания ИГМ СО РАН и ИГТ УрО РАН.

Для цитирования: Козлов П.С., Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Сухоруков В.П. Особенности петрогенезиса, георесурсы и перспективы практического использования высокоглиноземистых пород Северо-Енисейского кряжа (Восточная Сибирь) // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 6–35. doi: 10.17223/25421379/25/1

Original article

doi: 10.17223/25421379/25/1

PETROGENESIS, GEORESOURCES, AND PROSPECTS FOR PRACTICAL USE OF HIGH-ALUMINOUS ROCKS OF THE NORTH YENISEI RIDGE (EAST SIBERIA)

Pavel S. Kozlov¹, Igor I. Likhanov², Vladimir V. Reverdatto³, Vasilii P. Sukhorukov⁴

¹ A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UrB RAS, Ekaterinburg, Russia

^{2, 3, 4} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹ kozlov@igg.uran.ru

² likh@igm.nsc.ru

³ rever@igm.nsc.ru

⁴ svp@igm.nsc.ru

Abstract. The relevance of the research is due to fundamental and applied aspects. The polymorphic modifications of Al_2SiO_5 , namely kyanite, andalusite, and sillimanite – minerals of sillimanite group (MSG), are among the most important indicators of metamorphism in pelitic lithologies. The “triple point” corresponding to the equilibrium coexistence of all polymorphs Al_2SiO_5 is one of the most important invariant point in metamorphic petrology, and mineral associations with the participation of “triple point” polymorphs are informative for calibration of geothermobarometers. On the other hand, the Al_2SiO_5 polymorphs (andalusite, kyanite, and sillimanite), which are dominant constituents in aluminous metamorphic rocks of the North Yenisei Ridge, are gaining increasing importance as industrial sources for aluminum oxide, silumin, and aluminum.

The polymetamorphic history of a series of metamorphic complexes of Al-rich metapelites in the Yenisei Range, with rocks containing the Al silicate triple-point assemblage (all three Al_2SiO_5 polymorphs) is illustrated by geological-structural, mineralogical-petrological, and isotope geochronological evidence. In the studied aureoles, the overprinting of earlier mineral assemblages with the later ones during various geodynamic events obviously follows from the reaction microtextures and chemical zoning in minerals, the P – T trajectories of these rocks, as well as radiometric dating. These indicator features show that the Al_2SiO_5 polymorphs sequentially grew as a result of a complex polymetamorphic history due to the changes in the tectonic settings. In the Teya metamorphic complex, areas of development of metapelites of andalusite–sillimanite regional metamorphism have been established, within which the promising Panimba andalusite and Teya sillimanite deposits are concentrated. Products of the superimposed kyanite–sillimanite type of metamorphism in the thrust zone form a number of bimineral (andalusite–kyanite) (Mayakon, Chirimba, etc.) and polymineral (andalusite–kyanite–sillimanite) (Vorogovo, Lower Veduga, Nerazgadannoe occurrences, etc.) Analysis of the resource base of alumina-containing minerals in the region shows that a number of promising for high-alumina schists (HAS) objects have been discovered in the North Yenisei Ridge, the formation of which is genetically related to tectonic–metamorphic processes of the Grenville and Baikal orogeny. Their constituent MSG, as well as HAS containing staurolite and chloritoid, have sufficient resources for their use in industry together with the explored deposits of bauxite, alumina iron ores, and nepheline syenites.

Keywords: P – T – t evolution of metamorphism, high-alumina metapelites, Al_2SiO_5 polymorphs, bauxites, alumina iron and nepheline ores, Yenisei Ridge

Acknowledgments: The article is dedicated to the blessed memory of the recently deceased Honored Geologist of Russia, Professor Gennady Grigorievich Lepezin, who for many years was engaged in the study of metamorphism and substantiation of the involvement of high-alumina minerals of the sillimanite group from Eastern Siberia in the metallurgical industry of Russia.

Source of financing: This research was funded by Russian Science Foundation (RSF), grant No. 21-77-20018 with additional support of field works in the framework of the State Tasks of the Institute of Geology and Mineralogy (Novosibirsk) and Institute of Geology and Geochemistry (Ekaterinburg).

For citation: Kozlov P.S., Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Sukhorukov V.P. (2022) Petrogenesis, georesources, and prospects for practical use of high-aluminous rocks of the North Yenisei Ridge (East Siberia). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 6–35. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/25/1

Введение

Северо-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 комплексов региона 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 [Reverdatto et al., 2019]. 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. 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. 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]. Однако минералы группы силлиманита (андалузит, силлиманит, кианит), широко развитые в Заангарской части Енисейского кряжа, представляют особый интерес для производства глинозема, силумина и алюминия.

С одной стороны, Северо-Енисейского кряж – один из перспективных в Сибири регионов с потенциальными источниками высокоглиноземистого сырья из метаморфических метапелитовых комплексов высокоглиноземистых сланцев [Лепезин и др., 1979; Лепезин, Каргополов, Жираковский, 2010; Козлов, Лепезин, 1995]. С другой стороны, регион обладает большими запасами уже выявленных высокоглиноземистых пород других генетических типов, таких как бокситы, глиноземистые железные руды и нефелиновые сиениты. Экспериментальные исследования показали, что совместное их использование для получения глинозема, алюминия и других высокотехнологичных материалов является стратегически важным для России [Одокий, Воропаева, Леоненко, 1988; Лепезин, Семин, 1989; Лепезин, 1997, 2005; Жабин, 2012; Бандман, 2014] и для импортозамещения в огнеупорной отрасли [Лепезин, 2016].

В последнее десятилетие благоприятной для реализации этих идей является «Программа развития Нижнего Приангарья как пилотного проекта Сибири первой четверти XXI века». В 2006 г. на базе проекта Программы Институт региональной политики закончил Инвестиционный проект «Комплексное развитие Нижнего Приангарья». В проекте содержится утверждение, что «комплексное развитие Нижнего Приангарья» – это государственный и частный проект по созданию нового промышленного района в Красноярском крае на базе электроэнергии Богучанской гидроэлектростанции (БогЭС) и ресурсного потенциала региона. Основные производственные объекты Нижнего Приангарья были включены в перечень крупных инвестиционных проектов «Стратегии экономического развития Сибири до 2020 г.», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 7 июня 2002 г. № 765-р. Первоочередные объекты Программы освоения Нижнего

Приангарья, включенные в другие Федеральные целевые программы о создании Северо-Сибирской магистральной, входили в решения всех сибирских конференций, совещаний и в «Транспортную стратегию России», разработанную до 2030 г. [Бандман, 2014].

В 2018 г. на Красноярском экономическом форуме утвержден межрегиональный проект «Енисейская Сибирь». Проект включает в себя крупную инвестиционную программу «Развитие инфраструктуры и освоение ресурсной базы Ангаро-Енисейского экономического района». Развитие инфраструктуры (новые автомобильные и железные дороги, мосты и др.) позволит компаниям освоить новые месторождения полезных ископаемых, в том числе высокоглиноземистых сланцев – концентраторов ценных минералов Al_2SiO_5 – андалузита, силлиманита и кианита, которые, в свою очередь, могут быть использованы в качестве сырья как отдельно, так и в смеси с нефелиновыми, бокситовыми и другими рудами для получения глинозема [Лепезин, 2004, 2005; Козлов, 2017].

Образование высокоглиноземистых метаморфогенных пород региона связано, главным образом, с особенностями процессов железисто-глиноземистого литогенеза, тектоники и полиметаморфизма с переходным режимом давлений от низких к умеренным [Лиханов, Ревердатто, 2011, 2014; Лиханов, Ревердатто, Козлов, 2011а; Лиханов и др., 2011б]. В статье предпринята попытка обоснования вовлечения метаморфогенного сырья в цветную металлургию Приангарья в комплексе с другими источниками глиноземистого сырья в регионе. Такая оценка для Красноярского края важна в плане расширения сырьевой базы введенного в эксплуатацию Богучанского электро-металлургического объединения (БЭМО) в Нижнем Приангарье – совместного проекта компании РУСАЛ с российским производителем гидроэлектроэнергии «РусГидро». В состав комплекса вошли Богучанский алюминиевый завод (БоАЗ) проектной мощностью около 600 тыс. т алюминия в год и БогЭС мощностью 3000 МВт. Первая очередь опытного производства на БоАЗ запущена в эксплуатацию в 2015 г. В настоящее время глинозем для него поставляется из Австралии и других далеких стран. В связи с вводом в эксплуатацию БоАЗ в перспективе встает вопрос о его обеспечении отечественным сырьем.

В последние годы для Приангарья разработаны и действуют инвестиционная программа «Развитие инфраструктуры и освоение ресурсной базы Ангаро-Енисейского экономического района» [Бандман, 2014] и Межрегиональный проект «Енисейская Сибирь», утвержденный на Красноярском экономическом форуме в 2018 г. Согласно принятым документам, развитие инфраструктуры региона позволит

горнорудным компаниям освоить новые месторождения полезных ископаемых и в перспективе вовлечь их в металлургическое производство.

В настоящей статье на основе реконструкции P – T – t эволюции метаморфических комплексов высокоглиноземистых метапелитов Северо-Енисейского кряжа охарактеризованы месторождения и рудопроявления минералов группы силлиманита, а также бокситов, глиноземистых железных руд и нефелиновых сиенитов. На основе анализа современных методов и способов получения сплавов в металлургии [Салтыков, Баймаков, 2003; Баймаков и др., 2007; Лепезин и др., 2014; Черкасов, 2015] рассмотрены перспективы создания на их базе промышленных производств глинозема, силумина, алюминия и другой высокотехнологичной продукции в Приангарье.

Геологическое положение и основные структурные элементы Енисейского кряжа

Енисейский кряж представляет собой древний ороген коллизионно-аккреционного типа, расположенный на западной окраине Сибирского кратона [Likhanov, Santosh, 2017]. Он вытянут в субмеридиональном 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. 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. В строении Енисейского кряжа выделяются два крупных сегмента – Южно-Енисейский и Северо-Енисейский (Заангарский), разделенные субширотным Нижнеангарским региональным разломом [Ножкин и др., 2016]. К югу от этого разлома выделяются два структурных элемента – архей-палеопротерозойский кратонный Ангаро-Канский блок и неопротерозойский островодужный Предивинский террейн [Лиханов и др., 2016] (рис. 1, *a*). Северо-Енисейский кряж сложен палеопротерозойскими и мезо-неопротерозойскими породами, составляющими Восточный и Центральный кратонные блоки и Исаковский (западный) ост-

роводужный террейн. Все тектонические блоки и пластины разделены крупными региональными разломами – системами дизъюнктивов преимущественно северо-западного простирания с субвертикальным падением [Коробейников и др., 2006]. Отличительной особенностью приразломных структур является развитие специфического комплекса тектонитов – бластомилонитов и катаклазитов, прослеживающихся через весь кряж в виде ряда мощных зон субмеридионального простирания [Лиханов и др., 2013а; Бабичев и др., 2019]. Ишимбинско-Татарская шовная и Приенисейская сутурная региональные сдвиговые зоны [Козлов и др., 2020; Лиханов, Зиновьев, Козлов, 2021] сопровождаются опережающими структурами более высокого порядка, вблизи которых происходит коллизия мелких блоков с образованием надвигов [Попов, Лиханов, Ножкин, 2010]. Последнее вызывает неоднородный по давлению региональный метаморфизм, выраженный сочетанием двух фациальных серий низких и умеренных давлений [Лиханов и др., 2006; Likhanov, Reverdatto, 2011].

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

Характеристика объектов исследования

В стратиграфическом отношении район распространения высокоглиноземистых сланцев находится в пределах Горбилонской и Приенисейской структурно-фациальных зон [Постельников, 1990]. В геологическом строении принимают участие осадочно-метаморфические образования палеопротерозоя, мезо- и неопротерозоя и перекрывающие их отложения фанерозойского чехла. Положение объектов высокоглиноземистых сланцев в стратиграфической колонке Северо-Енисейского кряжа приведено на рис. 2.

Изученные участки расположены в пределах тейского и гаревского комплексов Северо-Енисейского кряжа (рис. 1) и приурочены к линейным зонам смятия вдоль Ишимбинско-Татарской 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].

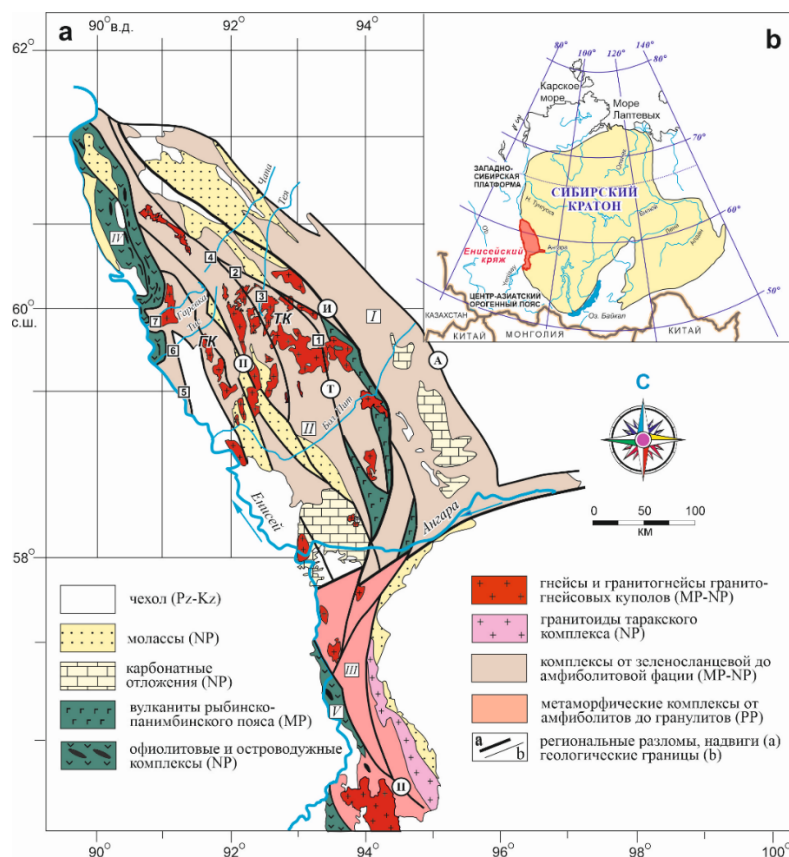


Рис. 1. Схематическая тектоническая карта Енисейского кряжа

и местоположение участков с проявлением ассоциации «тройной точки» *And+Sil+Ky*

a – ГК и ТК – гаревский и тейский метаморфические комплексы. Тейский комплекс (ТК): 1 – маяконский, 2 – полканский, 3 – тейский, 4 – чапский; гаревский комплекс (ГК): 5 – енисейский, 6 – тисский и 7 – гаревский участки. Тектонические блоки: I – Восточный и II – Центральный Заангарского сегмента; III – Южно-Енисейский (Ангара-Канский) сегмент, IV – Исаковский и V – Предивинский террейны. Региональные разломы: И – Ишимбинский, Т – Татарский, П – Приенисейский, А – Анкиновский, Н – Нижнеангарский. *б* – положение Енисейского кряжа в структуре Сибирского кратона

Fig. 1. Geological sketch map of the Yenisey Ridge showing location of the study areas with the “triple point” assemblage *And+Sil+Ky*

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

Их протяженность определяется сотнями километров при ширине зоны стресс-метаморфизма от сотен метров до первых десятков километров. Как правило, эти линеamentные зоны играют роль швов, разделяющих палеоокеанический и континентальный 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 ком-

плексом, 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, Régnier, Santosh et al., 2018].

Важнейшей особенностью изученных метаморфических комплексов является неоднородность метаморфизма по режиму давления, выраженная в проявлении регионального метаморфизма двух фашиальных серий: *And–Sil* (низких давлений) и *Ky–Sil* (умеренных давлений). Наиболее характерным примером совмещенной зональности двух фашиальных серий является тейский участок (см. рис. 3), расположенный в среднем течении р. Теи в междуречье Курепы и Уволги [Лиханов и др., 2011б]. 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±And* (*St–And* зона) и 4) *Sil+St+Grt+Bt+Ms+Qz+Pl±And±Crd* (*Sil* зона) (рис. 3).

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, промежуточному между пиренейским и мичиганским типами зональности по классификации А. Хитанен [Hietanen, 1967].

Его *P–T* условия соответствуют переходу от фашии зеленых сланцев до границы между эпидот-амфиболитовой и амфиболитовыми фашиями. 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 субфашии фашии 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 пиковых температур от 510 °C в биотитовой зоне до 640 °C в силлиманитовой зоне при изменении давления от 3,9 до 5,1 кбар, что свидетельствует о метаморфическом градиенте $dT/dH = 25–35$ °C/км. 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 °C) при приближении к надвигу, что указывает на весьма низкое значение $dT/dH \leq 10–12$ °C/км [Лиханов, Ревердатто, Козлов, 2012].

В пределах юго-восточной части Тейского метаконтекста прогрессивного регионального метаморфизма андалузит-силлиманитового *LP/HT* типа выявлено Панимбинское месторождение андалузита, залегающее в графитистых породах кординской свиты раннего мезопротерозоя (см. рис. 4). Минералом-индикатором метаморфизма низких давлений здесь является андалузит-хиастолит, содержание порфиروبластов которого колеблется от 3–5 до 30 об. % (рис. 5, а).

В строении Панимбинского участка с юго-востока на северо-запад выделяются три зоны регионального метаморфизма в углеродистых метапелитах с северо-восточным простиранием и со следующей последовательностью предельных минеральных ассоциаций: 1) *Ms+Chl+Qz±Prl* (внешняя зона), 2) *Ms+Chl+Qz+And±Bt* (средняя зона) и 3) *Ms+Chl+Qz+And+Bt±Pl±Grt±St* (внутренняя зона) (рис. 4). Внешняя зона сложена метапелитами с характерным развитием порфиروبластического хлорита величиной от долей до 1 мм. В средней зоне в углеродистых филлитах впервые появляется хиастолит в виде мелких порфиروبласт, размер которых постепенно возрастает к внутренней зоне до 4–8 мм в поперечном сечении и до 15–25 мм по удлинению. Ширина средней зоны варьирует от 140 до 280 м.

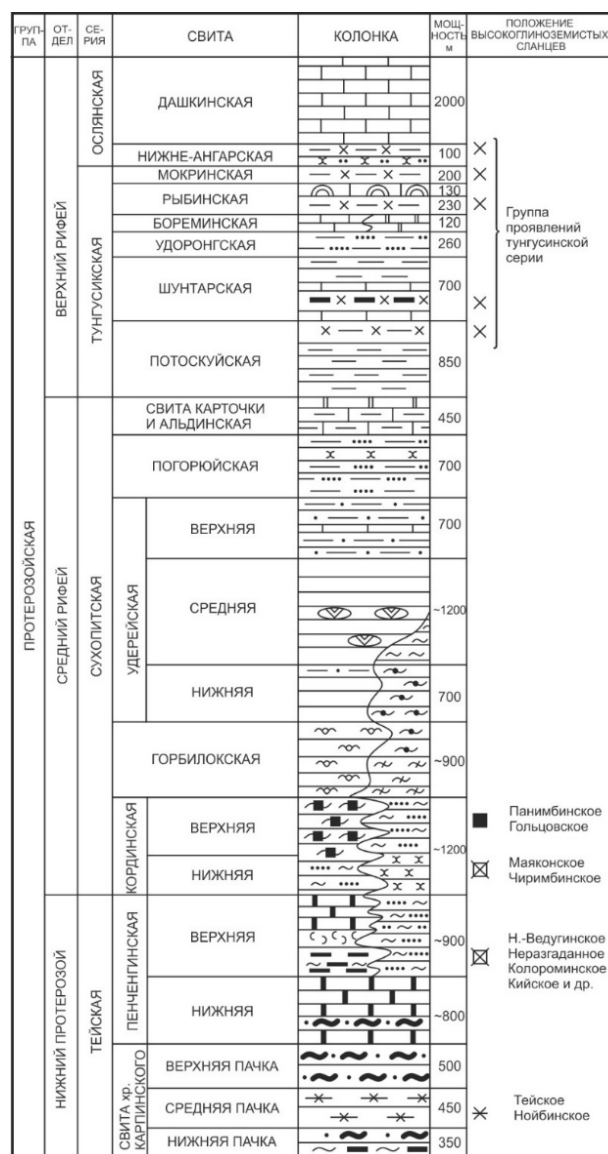


Рис. 2. Стратиграфическая колонка довендских образований восточной части Северо-Енисейского кряжа и положение в ней высокоглиноземистых сланцев (масштаб 1 : 50 000)

1 – туффы литокластические; 2 – сланцы хлоритоидные; 3 – глинистые сланцы; 4 – филлиты с линзами конкреций; 5 – сланцы хлорит-серицитовые; 6 – сланцы кварц-биотит-мусковитовые; 7 – сланцы кварц-графит-мусковит-биотит-андалузитовые; 8 – сланцы двуслюдяные с гранатом; 9 – сланцы двуслюдяные со ставролитом; 10 – сланцы алевроит-глинистые; 11 – алевролиты; 12 – металевролиты биотитовые; 13 – песчаники кварцитовидные, кварциты; 14 – доломиты; 15 – известняки строматолитовые; 16 – металевролиты известковистые, биотитовые; 17 – известняки, глинистые известняки; 18 – мраморы, кальцифиты с прослоями скарноидов; 19 – биотит-силлиманитовые гнейсы; 20 – амфиболовые роговикоподобные породы; 21 – графитисто-кварц-двуслюдяные сланцы; 22–25 – месторождения и проявления высокоглиноземистых сланцев: 22 – группа проявлений хлоритоидных сланцев тунгусикской серии, 23 – полиминеральные андалузит-кианит-силлиманитовые сланцы; мономинеральные высокоглиноземистые сланцы: 24 – графит-мусковит-биотит-андалузитовые (Панимбинское месторождение), 25 – биотит-силлиманитовые гнейсы (Тейское месторождение); 26 – границы литолого-фациальные и метаморфические

Fig. 2. Stratigraphic column of the pre-Vendian formations of the eastern part of the North Yenisei Ridge and the position of high-alumina shists in it (scale 1 : 50 000)

1 – lithoclastic tuffites; 2 – chloritoid schists; 3 – argillaceous shists; 4 – phyllites with lenses of nodules; 5 – chlorite-sericite shists; 6 – quartz-biotite-muscovite schists; 7 – quartz-graphite-muscovite-biotite-andalusite shists; 8 – two-mica schists with staurolite; 9 – two-mica schists with staurolite; 10 – silty-argillaceous shists; 11 – siltstones; 12 – biotite metaaleurolites; 13 – quartzite sandstones, quartzites; 14 – dolomites; 15 – stromatolite limestones; 16 – calcareous meta-siltstones, biotite; 17 – limestone, clayey limestone; 18 – marbles, calciphyres with interlayers of skarnoids; 19 – biotite-sillimanite gneisses; 20 – amphibole hornfels-like rocks; 21 – graphite-quartz-two-mica schists; 22–25 – deposits and occurrences of high-alumina shists: 22 – a group of occurrences of chloritoid shists of the Tungusik series, 23 – polymineral andalusite-kyanite-sillimanite shists; monomineral high-: 24 – graphite-muscovite-biotite-andalusite (Panimba deposit), 25 – biotite-sillimanite gneisses (Teya deposit); 26 – lithological-facies and metamorphic boundaries

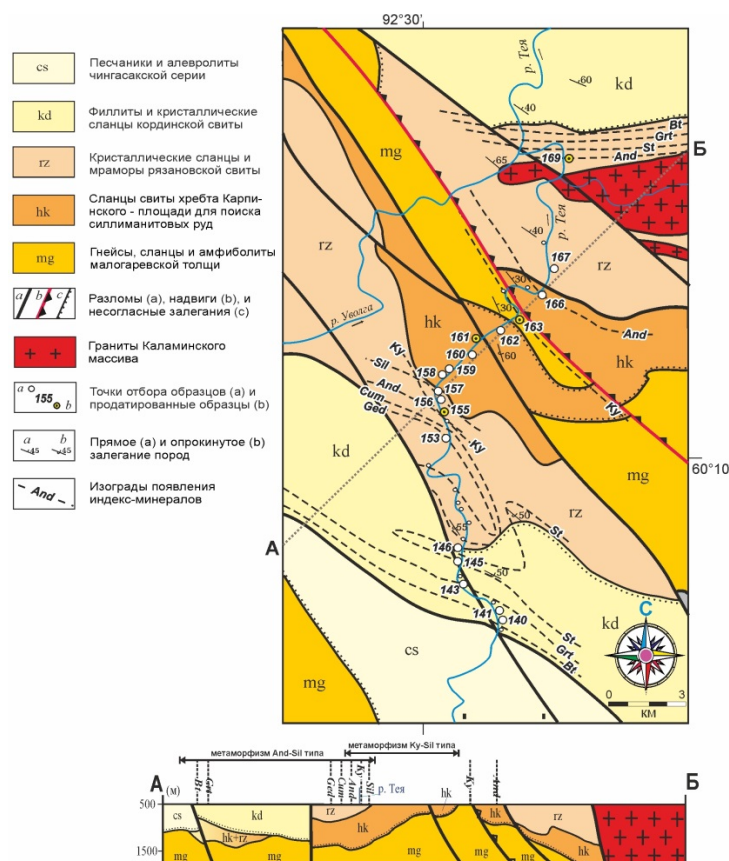


Рис. 3. Схематическая карта тейского полиметаморфического комплекса в среднем течении р. Тея (тейский участок) и разрез по линии А–Б

Fig. 3. Sketch map of the Teya polymetamorphic complex in the middle reaches of the Teya River (Teya area) and geological cross section through A–B line

Средняя зона протягивается узкой полосой северо-восточного простирания. В двух участках зоны выявлены проявления золота сульфидно-кварцевой формации, связанные с процессами окварцевания и турмалинизации метапелитов. Внутренняя зона занимает значительную площадь распространения кординской свиты. Ее видимая мощность варьирует от 80–100 м в средней части площади до 2–2,5 км к северу. Здесь сосредоточены наиболее богатые рудные залежи андалузитовых сланцев. В этой зоне отмечено максимальное содержание андалузита до 17 об. %, возрастающее по мере приближения к контакту с гранитами. Размер порфиروбласт в поперечнике достигает 2 см, по удлинению – 8–10 см. Детальный петрохимический состав пород и особенности минеральных парагенезисов метапелитов месторождения охарактеризованы в работе (Козлов, 1989). По характеру метаморфической зональности прогрессивный метаморфизм изученных пород относится к сравнительно малоглубинному *LP/HT* андалузит-силлиманитовому типу (бьюкенский тип зональности) по классификации А. Хитанен [Hietanen,

1967]. По минеральным ассоциациям внутренняя зона относится к эпидот-амфиболитовой фации, а средняя и внешняя зоны – к зеленосланцевой фации. В ряде мест на высокотемпературные парагенезисы наложен диафторез с формированием *Chl+Ser+Mrg* псевдоморфоз по андалузиту и кордиериту.

К северо-западу от месторождения, на простирании углеродистых андалузитовых (хиастолитовых) сланцев в бассейнах рек Еруда и Чиримба, расположен Маяконский участок высокоглиноземистых сланцев мезопротерозоя (1350–1250 млн лет) с развитием по ним хрупко-пластических деформаций и проградной минеральной зональности бластомилонитов с выделением трех зон дислокационного метаморфизма (см. рис. 6). Параллельно шву Панимбинского надвига выделены три метаморфические зоны наложенного метаморфизма, различающиеся соотношением реликтовых и новообразованных минералов, степенью деформации и *P–T* условиями метаморфизма пород [Лиханов и др., 2007]. Осадочно-метаморфические породы кординской свиты испытали метаморфизм низких и умеренных давлений [Лиханов и др., 2001].

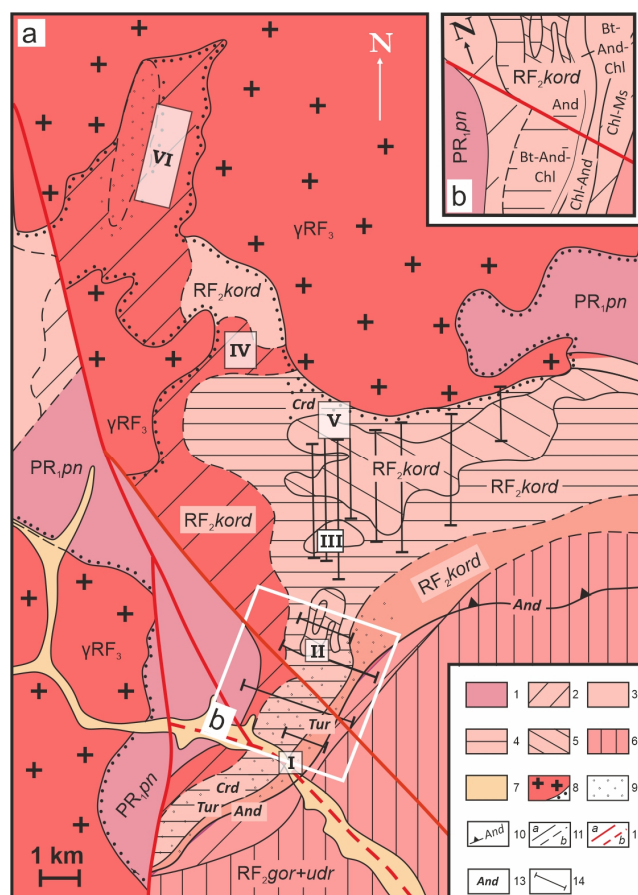


Рис. 4. Схематическая геологическая карта района Панимбинского участка – а; метаморфическая зональность – б

Протерозой: пенченгинская свита (PR_{1pn}): 1 – мраморы, кальцифиры, парамфиболиты; рифей: кординская свита (RF_{2kord}): 2 – Ms-Bt сланцы, 3 – And-содержащие Gr-Ms-Bt сланцы, 4 – Grt-Ms-Bt-And сланцы, 5 – And-обогащенные Gr-Ms-Bt-And сланцы (рудные залежи); объединенные гориблокская и удерейская свиты (RF_{2gor+udr}): 6 – филлиты с прослоями метаалевролитов; кайнозой: 7 – четвертичные аллювиальные отложения. 8 – гранитоиды Чиримбинского массива (γRF₃) и контактово-метаморфические породы (роговики и мраморы). 9 – породы, затронутые диафторезом. 10 – изограда андалузита. 11 – геологические границы: достоверные (а), предполагаемые (б). 12 – разломы: установленные (а), предполагаемые (б). 13 – места находок специфических минералов: And, Crd, Tur. 14 – линии горных выработок. Площади отбора проб: I = Qz-Ser-Chl-Bt (±Gr) филлиты; II = And-содержащие Gr сланцы; III = And-Bt сланцы; IV = Grt-Bt-St-Ky-Chl-Ms сланцы; V = роговики; VI = And-Bt-Ms-Ky-St сланцы

Fig. 4. Schematic geological map of the Panimba area – а; metamorphic zoning – б

Proterozoic: Penchenga Formation (PR_{1pn}): 1 – marbles, calciphyres, paramphibolites; Riphean: Korda Formation (RF_{2kord}): 2 – Ms-Bt shists, 3 – And-bearing Gr-Ms-Bt shists, 4 – Grt-Ms-Bt-And shists, 5 – And-enriched Gr-Ms-Bt-And shists (ore deposits); combined Goriblok and Uderei formations (RF_{2gor+udr}): 6 – phyllites with interlayers of metaaleurolites; Cenozoic: 7 – Quaternary alluvial deposits, 8 – granitoids of the Chirimba massif (γRF₃) and contact-metamorphic rocks (hornfels and marbles), 9 – rocks affected by diaphoresis, 10 – andalusite isograd, 11 – geological boundaries: reliable (a), assumed (b), 12 – faults: established (a), assumed (b), 13 – places where specific minerals were found: And, Crd, Tur, 14 – lines of mine workings. Sampling areas: I = Qz-Ser-Chl-Bt (±Gr) phyllites; II = And-bearing Gr shists; III = And-Bt shists; IV = Grt-Bt-St-Ky-Chl-Ms shists; V = hornfelses; VI = And-Bt-Ms-Ky-St shists

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 образованием $Ms+Ky+St+Qz$ псевдоморфоз по хиастолиту (рис. 5, б), последовательно сменяются ассоциацией

$Ms+Chl+Bt+Qz+Ky+St+Grt+Ilm+Pl$ с реликтами андалузита и присутствием силлиманита и фибролита к надвику, метаморфизованы в условиях фации кианитовых сланцев.

$P-T$ параметры бластомилонитов маяконского участка отвечают значениями $P = 4,5-6,7$ кбар, $T = 560-600$ °C и метаморфическому градиенту $dT/dH = 6-7$ °C/км.

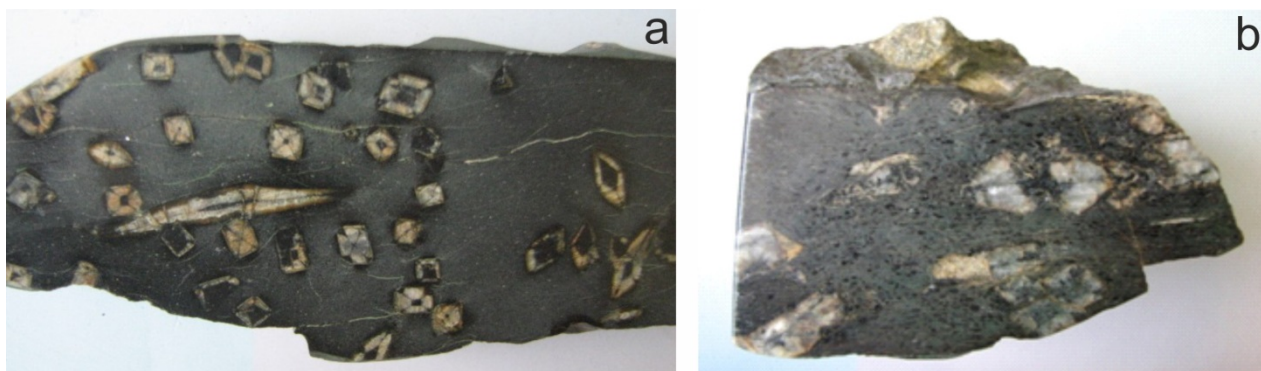


Рис. 5. Хиастолитовые углеродистые сланцы кординской свиты из внешней зоны регионального метаморфизма низких давлений андалузит–силлиманитового типа (Панимбинское месторождение) – а; псевдоморфозы $Ky+St+Ms+Qz$ состава по порфиробластам хиастолита в сланцах кординской свиты как результат наложения коллизионного метаморфизма на метapelиты низких давлений в районе Панимбинского надвига (Маяконское рудопроявление) – б

Fig. 5. (a) Chiastolite carbonaceous schists of the Korda Formation from the outer zone of regional low-pressure metamorphism of the andalusite-sillimanite type (Panimba site); (b) Pseudomorphs of quartz-kyanite-muscovite-staurolite composition along chiastolite porphyroblasts in schists of the Korda Formation as a result of overprint of collision metamorphism on low-pressure metapelites in the area of the Panimba thrust fault (Mayakon ore occurrence)

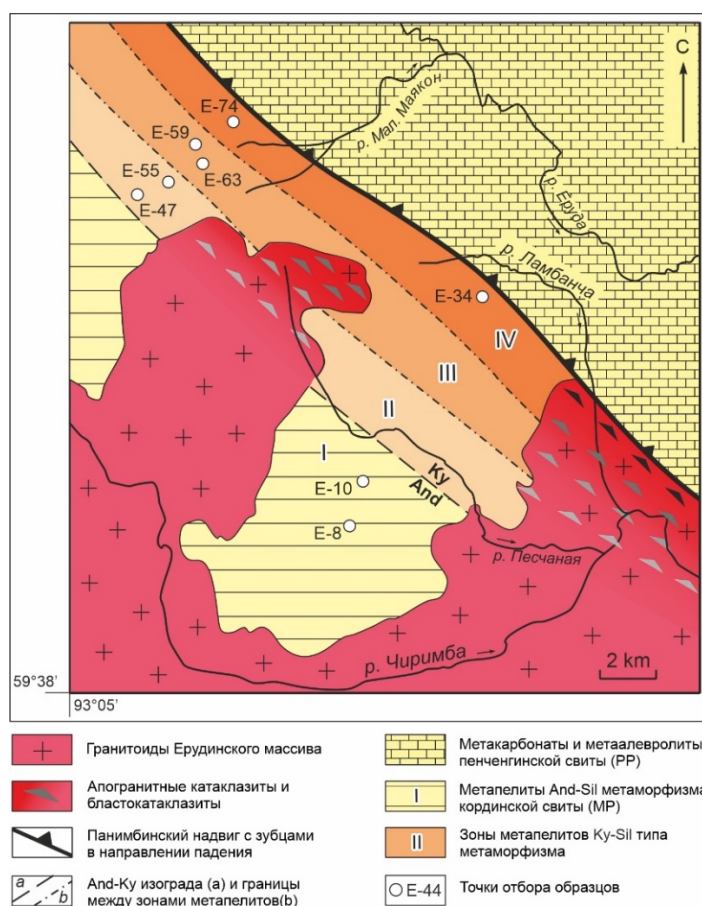


Рис. 6. Схематическая карта метаморфизма междуречья рек Еруда и Чиримба (маяконский участок)

Fig. 6. Geological sketch map of the Mayakon area in the Eruda and Chirimba Rivers interfluvium in the vicinity of the Panimba overthrust showing location of metamorphic zones in metapelites

Бластомилониты образуют 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 палеопротерозойские метатерригенно-карбонатные породы тейской серии.

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 метапелитах $And-Sil$ типа полканского и маяконского участков может быть связано с большей устойчивостью Mn-граната на средних ступенях метаморфизма [Лиханов, Ревердатто, Селятицкий, 2005].

Микроструктурные взаимоотношения между полиморфами Al_2SiO_5 свидетельствуют о последовательном росте андалузита, силлиманита, фибролита и кянита при метаморфизме с преобладанием различных схем реакционных замещений между этими минералами (Likhonov, Santosh, 2020) (рис. 7). Для маяконского участка характерны следующие реакционные соотношения $And \rightarrow Ky \rightarrow Sil \pm Fi$; для полканского участка $And \rightarrow Ky \rightarrow Sil$; для чапского $And \rightarrow Sil + Ky$; для тейского участка $And \rightarrow Sil \rightarrow Ky + Fi$. Эти особенности обусловлены сложной метаморфической историей пород, связанной со сменой тектонических обстановок [Лиханов, 2020а, б; Лиханов, Ревердатто, 2021]. 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 кянита/силлиманита и расчетам $P-T-t$ трендов эволюции пород.

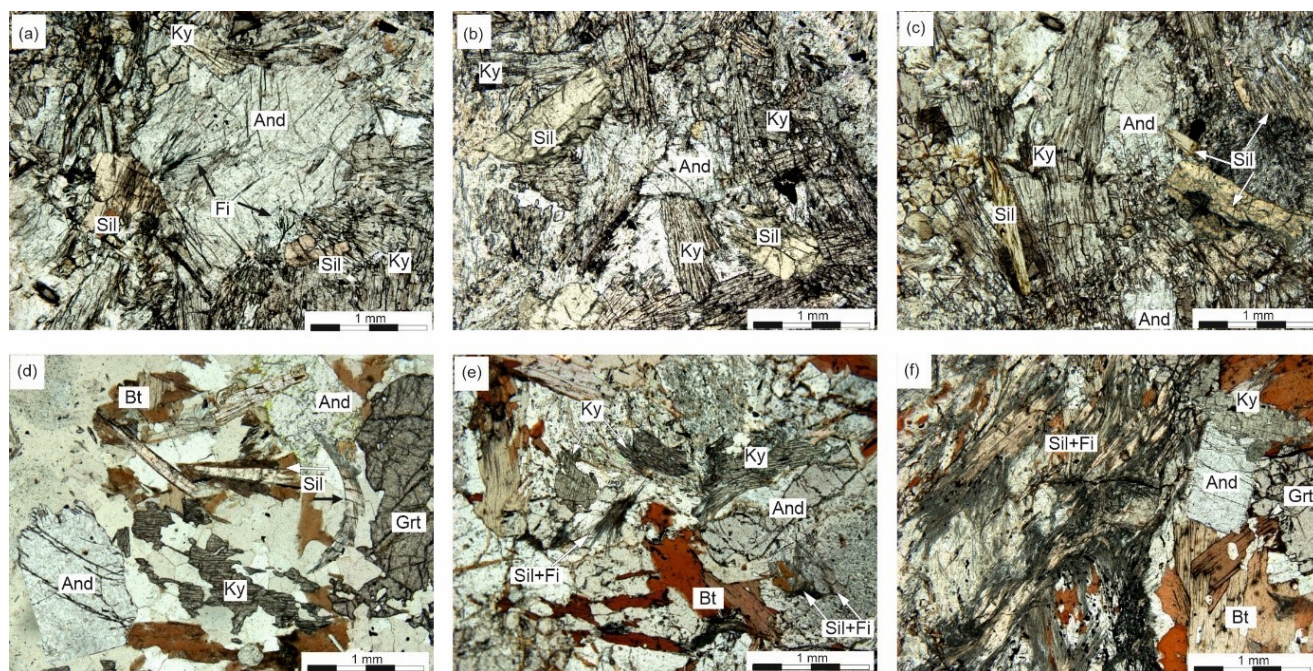


Рис. 7. Микрофотографии петрографических шлифов метапелитов, иллюстрирующие микроструктурные взаимоотношения между полиморфами Al_2SiO_5 участков тейского комплекса

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

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) $And \rightarrow Ky \rightarrow Sil \pm Fi$; (c – Polkan area) $And \rightarrow Ky \rightarrow Sil$; (d – Chapa area) $And \rightarrow Sil \rightarrow Ky$; and (e, f – Teya area) $And \rightarrow Sil \rightarrow Ky + Fi$

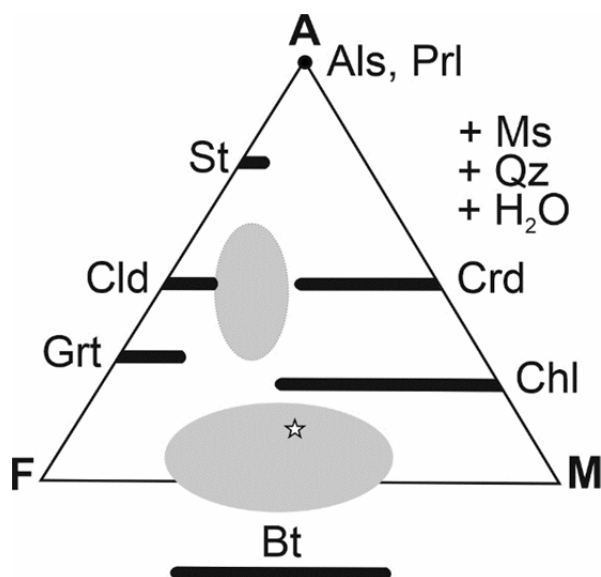


Рис. 8. Диаграмма AFM, иллюстрирующая химические составы пород и минералов типичных (затемненный эллипс, вытянутый в направлении F–M) и железисто-глиноземистых метапелитов (затемненный эллипс, вытянутый в направлении вершины A) [Likhanov, 1988]

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

Геохимическая специфика и особенности происхождения пород

По химическому составу эти *And+Ky+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 (Symmes, Ferry, 1992) эти породы относятся к железистым ($X_{\text{Fe}} = \text{FeO}/[\text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}] = 0,6\text{--}0,8$ на мольной основе) и глиноземистым ($X_{\text{Al}} = [\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{K}_2\text{O}]/[\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{K}_2\text{O} + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}] = 0,4\text{--}0,6$) 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 (см. рис. 8). Содержания редких элементов и их индикаторных отношений в изученных метапелитах разных комплексов похожи [Лиханов, Ревердатто, Вершинин, 2008; Лиханов,

Ревердатто, 2008; Likhanov et al., 2015; Лиханов, Ревердатто, 2022]. Совокупности распределения РЗЭ, нормированные к составу хондрита, для большинства метапелитов 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, Memmi, 1994; Лиханов, 2003; Likhanov, Reverdatto, 2007]. Унаследованность первичного состава магматического субстрата подтверждается высокой положительной линейной корреляцией между содержаниями высокочarged некоррелируемых элементов – Zr, Hf, Y, Ta, Nb. На их происхождение из протолитов кислого состава указывают также повышенные отношения Th/Sc , Th/U и пониженные Co/Th относительно среднего состава постаршеих глинистых сланцев. Ранними реконструкциями состава протолита аналогичных по составу железисто-глиноземистых метапелитов гарев-

ского и тейского комплексов было установлено, что они представляют собой переотложенные и метаморфизованные продукты докембрийских кор выветривания каолинитового типа [Likhanov, 2022]. Образование протолита этих пород происходило за счет размыва палеопротерозойских гранитогнейсов Сибирского кратона с возрастными в диапазоне 1,9–2,1 млрд лет [Likhanov, 2019]. Об этом же свидетельствует присутствие в источниках сноса во время формирования тейской и малогаревской толщ высококодифференцированного гранитного материала [Ножкин и др., 2016].

***P-T-t* особенности эволюции метаморфизма высокоглиноземистых метапелитов**

Важнейшей особенностью изученных метаморфических комплексов является неоднородность метаморфизма по режиму давления, выраженная в проявлении прогрессивного регионального мета-

морфизма двух фациальных серий и синэкстумационного регрессивного метаморфизма (рис. 9). 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 $dT/dH=25-35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ (Панимбинский тип). На втором этапе эти породы подверглись неопротерозойскому коллизионному метаморфизму умеренных давлений *Ky-Sil* типа с локальным повышением давления вблизи надвигов при весьма низком градиенте $dT/dH=7-14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, в результате чего происходило прогрессивное замещение $\text{And} \rightarrow \text{Ky} \pm \text{Sil}$ 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.

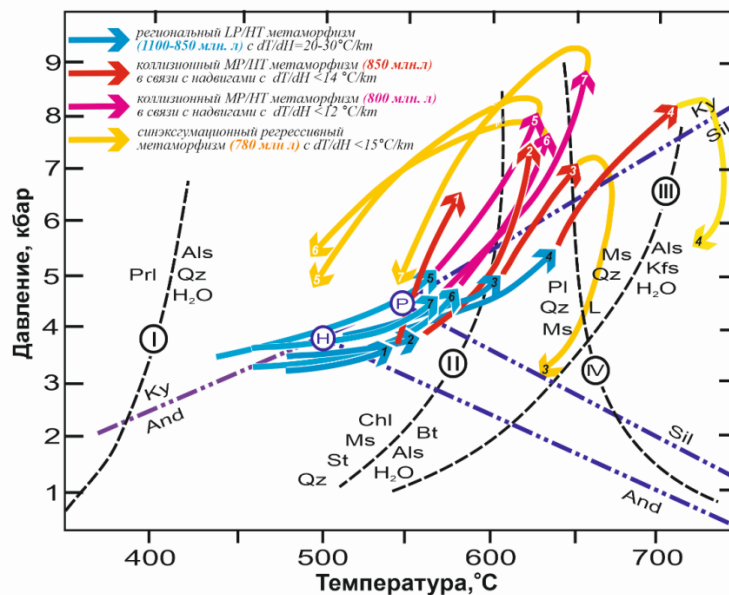


Рис. 9. *P-T* тренды метаморфизма для высокоглиноземистых метапелитов Заангарья Енисейского кряжа

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

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 [Лиханов и др., 2013б].

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 экзугмации в различных геодинамических обстановках: эрозивной 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.

Характеристика рудопроявлений высокоглиноземистого сырья Северо-Енисейского кряжа

В пределах Северо-Енисейского кряжа пользуются распространением четыре основных типа глиноземсодержащих руд: метаморфогенные минералы группы силлиманита (МГС), бокситы, глиноземистые железные руды и нефелиновые сиениты (рис. 10).

Минералы группы силлиманита – андалузит, силлиманит, кианит – широко развиты в докембрии Северо-Енисейского кряжа, представляют особый интерес с точки зрения производства глинозема, силумина и алюминия. Целенаправленные поисковые работы на них здесь проводились в 1956–1960 гг. Ангарской ГРЭ Красноярского геологического управления. В результате выявлены Гольцовское, Панимбинское и Чиримбинское рудопроявления андалузитовых (1956 г.), а впоследствии – Тейское и Нойбинское – силлиманитовых сланцев (1958–1960 гг.).

Панимбинское месторождение андалузита. Породы, содержащие полезный минерал, развиты здесь на площади, превышающей 10 км² [Козлов, 1989].

Рудные тела имеют линзообразную форму и субмеридиональное, согласное с общим напластованием пород простирание. Выявлены северная и южная залежи с параметрами (1 200 × (50–750) м и (650 × 40) м соответственно). Минералогический состав руд: кварц, андалузит-хиастолит (5–30 об. %), серицит, графит. Содержания глинозема в рудных телах по результатам химического (мас. %) и минералогического (об. %) анализов четырех проб: 19,08 % (7,7 % андалузита), 19,32 % (12,1 %), 21,16 % (16,1 %) и 19,06 (10,9 %). Суммарные прогнозные ресурсы месторождения по двум залежам при экстраполяции на глубину 200 м при объемном весе руд 2,76 г/см³ оцениваются в 2 820 млн т (табл. 1).

Из проявлений силлиманита наиболее перспективным является *Тейское месторождение*, площадь выходов слагающих пород которого составляет 14 км². Сланцы продуктивной пачки состоят (об. %) из кварца (15–50), биотита (20–60), силлиманита – фибролита (10–40). Среднее содержание глинозема в них равно 19,16 мас. %. Наиболее крупное рудное тело имеет линзовидную форму и субширотное простирание, общая его протяженность – 2,9 км, мощность 130–190 м, площадь выходов – 0,4 км². При концентрации силлиманита 22 % при объемном весе руды 2,48 г/см³ его прогнозные ресурсы на условную глубину 300 м оцениваются в 300 млн т.

Маяконское рудопроявление расположено к северу от Панимбинского и сходно с ним по составу слагающих пород. Руды состоят из кварца, биотита, графита, андалузита (6,5–15 об. %), ставролита, мусковита и кианита (до 3,5 об. %). Вне зоны «кианита» кристаллы хиастолита достигают 8 см в длину и до 1,5 см в поперечнике. Содержание глинозема в рудах достигает 23,9 мас. % ($\bar{X}$ = 20,3%). Прогнозные ресурсы в пересчете на полезный минерал по двум рудным телам на глубину 50 м оцениваются в 44 млн т.

В 1960-х гг. Ленинградским институтом огнеупоров проведены технологические испытания по обогащению двух проб весом 500 кг с Панимбинского и Тейского месторождений. Минералогический состав первой пробы: андалузит, кварц, биотит, мусковит, серицит, каолинит; ее химический состав (мас. %): SiO_2 = 60,3–61,99; TiO_2 = 0,95; Al_2O_3 = 22,27; Fe_2O_3 = 7,59; CaO = 0,41–0,55; MgO = 1,51–2,21; Na_2O + K_2O = 2,93–3,12; п.п.п. = 1,97–2,8, огнеупорность 1350 °С. Получен флотационный концентрат состава (мас. %): SiO_2 = 36,48, Al_2O_3 = 57,14; TiO_2 = 1,6; Fe_2O_3 = 2,22. Минералогический состав силлиманитсодержащей пробы: силлиманит, кварц, биотит, графит, мусковит; химический состав (мас. %): SiO_2 = 60,25; TiO_2 = 1,42; Al_2O_3 = 18,2; Fe_2O_3 = 6,69; MgO = 1,58; CaO = 0,42; Na_2O + K_2O = 2,68; SO_3 = 0,35; п.п.п. = 2,48; огнеупорность 1 430 °С.

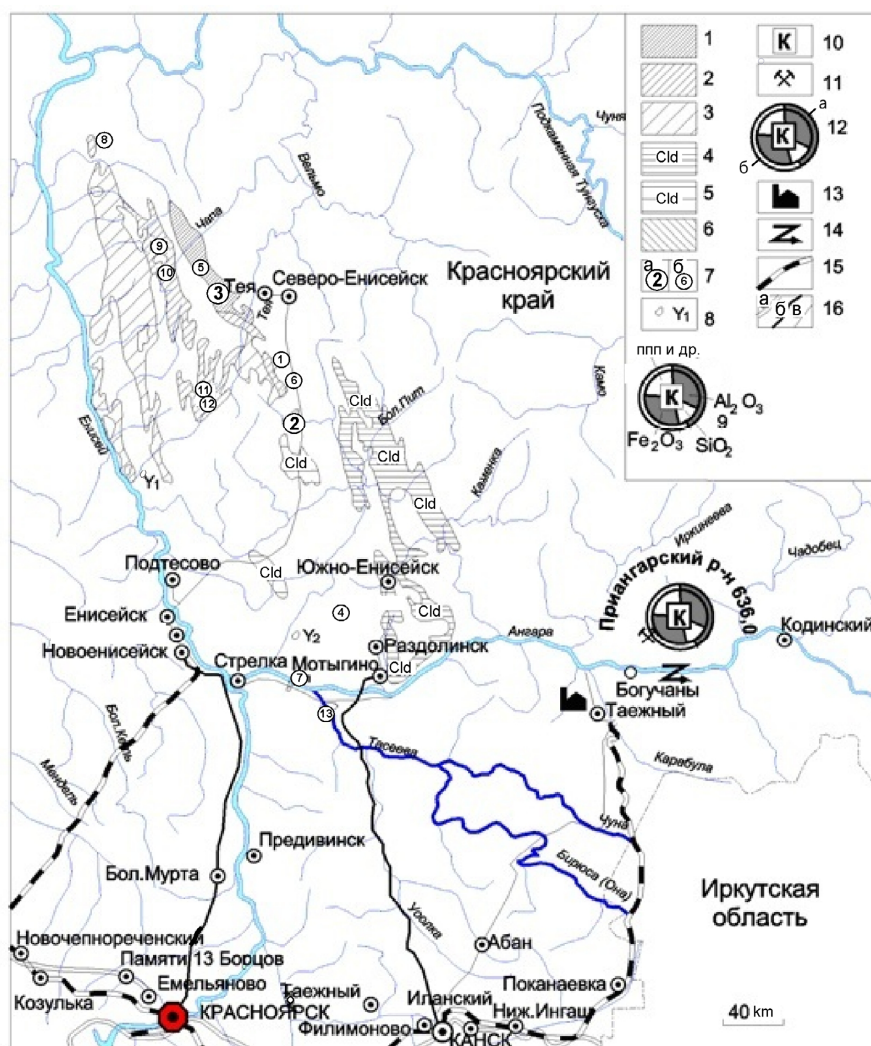


Рис. 10. Схема размещения площадей докембрийских осадочно-метаморфических пород Северо-Енисейского края с перспективами на высокоглиноземистые минералы и их возможное использование в производстве алюминиевых сплавов на Богучанском алюминиевом металлургическом заводе

1 – площади, перспективные на силлиманит; 2 – находки андалузита, силлиманита, дистена; 3 – проявления минерализации МГС; 4–5 – площади развития хлоритоидных сланцев: 4 – перспективные на хлоритоид, 5 – находки хлоритоида; 6 – гранат-ставролит-слюдяные сланцы; 7 – а) мономинеральные месторождения (2 – Панимбинское андалузита, 3 – Тейское силлиманита (цифры в больших кружках)) и б) рудопоявления высокоглиноземистых минералов (цифры в мелких кружках) группы рудопоявлений МГС: мономинеральные, 4 – Гольцовское (андалузит), 5 – Нойбинское (силлиманит); биминеральные (андалузит, кианит): 1 – Маяконское, 6 – Половинкинское; полиминеральные (андалузит, кианит, силлиманит): 7 – Вороговское, 8 – Нижне-Ведугинское, 9 – Неразгаданное, 10 – Малокийское, 11 – Кийское, 12 – Чиримбинское; 13 – Тасеевское гранат-ставролитовых сланцев; 8 – массивы щелочных сиенитов (1 – Кийский, 2 – Средне-Татарский); 9 – Приангарский рудный район железноалюминиевого сырья (бокситы и глиноземистые железные руды) с суммарными запасами 636,0 млн т [Одокий, Воропаева, Леоненко, 1988]: химический состав железноалюминиевого сырья в мас. %; 10 – меловой возраст бокситов; 11 – возможный открытый способ добычи; 12 – запасы (а) и прогнозные ресурсы (б) железноалюминиевого сырья; 13–14 – Сооружения проекта «Богучанское электро-металлургическое объединение» (БЭМО): 13 – действующий Богучанский алюминиевый металлургический завод, 14 – действующая Богучанская гидроэлектростанция. Дороги: 15 – железные, 16 – автомобильные, их значение а) общегосударственное, б) республиканское, в) местное

Fig. 2. The location scheme of distribution areas of Precambrian sedimentary-metamorphic rocks, potential for searching high-alumina minerals, within the Trans-Angara segment of the Yenisei Ridge

1 – areas, potential for sillimanite, 2 – finds of andalusite, sillimanite, and kyanite, 3 – ore occurrences of MGS, 4 – potentially chloritoid-bearing occurrences, 5 – finds of chloritoid, 6 – mica-garnet-staurolite schists, 7 – deposits (a) (T – Teya, P – Panimba); (b) occurrences of high-alumina minerals (V – Vorogovka, NZ – Nerazgadannoe, MK – Malokiya, KU – Kiya, C – Chirimba, N – Noiba, G – Golets, Pl – Polovinka), 8 – massifs of alkaline syenites (1, Kiya, 2, Middle Tatarka); (9–17) Cis-Angara area with reserves 636.0 mln t [Odokey, Voropaeva, Leonenko, 1988]: 9 – reserves (a) and inferred resources (b); 10 – Cretaceous age of the ore formation; 11 – possible open-cut mining, 12 – composition of ores, 13 – Boguchansk Smelter, 14 – Boguchansk hydroelectrostation, 15 – railways, 16 – highways of different level

Таблица 1

Характеристика рудопоявлений высокоглиноземистых пород Северо-Енисейского кряжа

Table 1

Characteristics of ore occurrences of high-alumina rocks of the North Yenisei Ridge

Рудопоявления МГС	Форма рудных тел	Протяженность/мощность, м	Среднее содержание МГС, об. %	Среднее содержание Al_2O_3 , мас. %	Суммарные ресурсы руд, млн т
Панимбинское (And)	Линзообразная	650–1 200/ 400–750	16,1	20,7	2800
Тейское (Sill)	Линзообразная	1 100–2 900/ 50–100	16,5	19,2	300
Маяконское (And+Ky)	Линзообразная	900–1 000/80	15,0	19,4	44

Химический состав концентрата (мас. %): Al_2O_3 = 54,57 %, SiO_2 = 41,00 %, TiO_2 = 0,32 %, Fe_2O_3 = 1,77 % при выходе 13,95 % и извлечении силлиманита 79 %. Обогащение производилось также по флотационной схеме.

В 1979–1980-х гг. Немчанская партия Ангарской ГРЭ провела поисковые и горные работы на 21-м участке в Центральной части кряжа в пределах Северо-Енисейского и Мотыгинского районов и Эвенкийского национального округа Красноярского края. В результате были подтверждены перспективы Панимбинского и Тейского участков, по ним подсчитаны прогнозные ресурсы руд, в сумме составляющие 3,1 млрд т, но данная оценка ресурсов представляется несколько завышенной вследствие отсутствия изученности участков буровыми работами (см. табл. 1).

В последующем на базе составленной Карты метаморфизма Заангарья осуществлена типизация метаморфических пород и выделены перспективные площади развития МГС [Козлов, Лепезин, 1995]. В практическом отношении наибольший интерес представляют, прежде всего, метаморфические породы, содержащие силлиманит. Заметный прирост его запасов может быть достигнут к северо-востоку и юго-западу от Тейского месторождения в полосе шириной около 6 км и протяженностью 75–80 км (водоразделы рек Чапы–Теи–Енашимо). В качестве первоочередного для постановки поисковых работ может быть участок вблизи Каламинского гранитоидного массива (водораздел руч. Елизаветинского и Борзцовского). На основании проведенного анализа литолого-стратиграфических особенностей пород и эволюции метаморфизма нами выявлены новые перспективные площади палеопротерозойских метапелитов амфиболитовой фации свиты хребта Карпинского для поиска силлиманитовых руд и гранулированного кварца в юго-западном обрамлении Каламинского массива, требующие проведения деталь-

ных маршрутных и горных работ. В частности, в прилегающих к р. Тея районах была оконтурена зона распространения силлиманита площадью около 40 км², где содержание глинозема в сланцах по штуфным пробам достигает 30 мас. % (рис. 3). Встречаются среди них и кварц-силлиманитовые кварциты, близкие по составу к рудам Кяхтинского и Базыбайского месторождений. Среднестатистические составы руд, содержащих минералы группы силлиманита, разных рудопоявлений заангарской части показаны в табл. 2.

Рентгеноспектральные анализы андалузитов приведены в табл. 3. Они близки к теоретическому составу МГС. Из примесных компонентов в них присутствуют железо и марганец, но в предельно малых количествах.

В заключение данного раздела вкратце охарактеризуем проявления других высокоглиноземистых сланцев, которые пользуются широким распространением в мезо- и неопротерозойских осадочно-метаморфических комплексах Северо-Енисейского кряжа.

Хлоритоидсодержащие сланцы слагают обширные по площади поля в Ангаро-Питском и менее – в Ангаро-Тисском зеленосланцевых комплексах (см. рис. 10). В междуречье Горбилка, Пита, Ангары они тесно ассоциируют с метапесчаниками, углеродистыми филлитами, доломитами и строматолитовыми известняками, образуя стратифицированные (стратиформные) залежи с субгоризонтальным залеганием пластов в Ангаро-Питском железорудном бассейне в осянской серии неопротерозоя (см. рис. 2). Первое появление мелких порфиروبластов хлоритоида отмечено в метапелитах потоскуйской свиты, содержание которых несколько повышается в направлении к тунгусикской и осянской сериям.

Значительная по содержанию минерализация хлоритоида установлена в метапелитах верхнепотоскуйской и нижнерыбинской подсвит, в мок-

ринской и нижнеангарской свитах. Установлено закономерное возрастание процентного содержания порфиروبластов хлоритоида от единичных пластинок в потоскуйской свите метапелитов до 20–30 об. % в нижнеангарской свите в зависимости от химического состава исходных пелитов и в направлении к ядрам синклинальных структур. Распределение хлоритоида внутри продуктивных пластов также неоднородное и контролируется различиями в уровне железистости и глиноземистости исходных пород [Юдин, 1968]. Низкая степень метаморфизма в условиях фации зеленых сланцев и присутствие в

разрезах маркирующих горизонтов известняков позволяет картировать их на многие километры по простиранию. Минералогический состав хлоритоидных сланцев: кварц, серицит, хлорит, хлоритоид. Количество хлоритоида в сланцах достигает максимум 30–40 об. %, содержание Al_2O_3 в сланцах составляет 23 мас. % (табл. 2). В Ангари-Тисском комплексе заслуживает внимание район р. Морянихи, где хлоритоидные сланцы, коррелируемые по минеральному составу со сланцами киргитской серии восточной части Северо-Енисейского кряжа, разбурены в крыльях Морянихинской антиклинали.

Таблица 2

Среднестатистические составы руд Северо-Енисейского кряжа, содержащих минералы группы силлиманита и хлоритоид

Table 2

Average statistical compositions of ores of the North Yenisei Ridge containing minerals of the sillimanite group and chloritoid

Группы МГС	Мономинеральные <i>And (Sil, Cld)</i>			Биминеральные <i>And+Ky</i>	Полиминеральные <i>And+Sil+Ky</i>
Оксиды	1 (n = 98)	2 (n = 60)	3 (n = 37)	4 (n = 11)	5 (n = 14)
SiO ₂	61,2±2,85	61,99±5,36	57,41±3,48	59,73±2,93	60,95±3,52
TiO ₂	1,07±0,05	0,86±0,19	1,34±0,88	0,81±0,06	0,96±0,23
Al ₂ O ₃	18,71±2,13	19,16±3,57	22,98±2,86	20,55±2,02	19,98±1,98
Fe ₂ O ₃	4,08±1,25	3,69±1,69	1,82±0,02	3,92±1,00	1,97±1,46
FeO	3,95±1,42	4,73±1,57	6,41±0,26	4,29±1,13	5,10±1,60
MnO	0,07±0,05	0,06±0,03	0,06±0,01	0,10±0,02	0,07±0,04
MgO	1,36±0,47	0,94±0,53	0,80±0,09	1,53±0,54	2,07±0,65
Na ₂ O	0,89±0,19	0,70±0,22	0,98±0,21	1,08±0,14	1,42±1,02
K ₂ O	3,77±0,67	2,98±0,70	2,46±1,00	4,01±0,48	3,42±0,51
П.п.п.	4,63±0,49	5,76±1,47	4,91±3,65	3,63±0,66	3,40±1,33

Примечание. 1–3 – мономинеральные высокоглиноземистые сланцы: 1 – *And* (Панимбинское рудопроявление), 2 – *Sil* (Тейское рудопроявление), 3 – *Cld* (бассейн рек Бол. Пит–Горбилук); 4 – биминеральные: *And+Ky* (Маяконское проявление); 5 – полиминеральные: *And+Sil+Ky* (Нижне–Ведугинское, Колороминское, Неразгаданное, Кийское проявления). Выборки 1, 2, 4, 5 – бороздовые пробы, 3 – штучные; n – число проб по которым производилось усреднение; средние значения ($\bar{X}$) приведены со стандартным отклонением, мас. %; п.п.п. – потери при прокаливании

Note. 1–3 – monomineral high-alumina shists: 1 – *And* (Panimba ore occurrence), 2 – *Sil* (Teya ore occurrence), 3 – *Cld* (Bol. Pit–Gorbiluk river basin); 4 – bimineral: *And+Ky* (Mayakon occurrence); 5 – polymineral: *And+Sil+Ky* (Lower Veduga, Nerazgadannoe, Koloromo, Kiya manifestations). Samples 1, 2, 4, 5 – groove samples, 3 – hand samples. n is the number of samples over which averaging was performed; mean values ($\bar{X}$) are given with standard deviation, wt. %, п.п.п. – loss on ignition

Таблица 3

Рентгеноспектральные анализы андалузитов Панимбинского рудопроявления, мас. %

Table 3

X-ray spectral analyzes of andalusites of the Panimba ore occurrence, wt. %

№	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	Сумма	Формула
1	62,56	0,02	0,21	0,01	0,04	100,44	Al _{1,99} Si _{1,00} O ₅
2	63,10	–	0,24	–	0,03	99,66	Al _{2,02} Si _{0,98} O ₅
3	62,85	–	0,26	0,02	0,04	100,06	Al _{2,00} Si _{1,00} O ₅
4	62,78	0,05	0,24	–	0,01	99,74	Al _{2,01} Si _{0,99} O ₅
5	62,98	–	0,23	0,01	0,03	99,80	Al _{2,01} Si _{0,99} O ₅
6	62,80	–	0,21	0,01	0,03	99,56	Al _{2,01} Si _{0,99} O ₅
7	62,39	–	0,36	–	0,01	99,38	Al _{2,00} Si _{1,00} O ₅
8	63,25	0,01	0,24	–	0,04	99,56	Al _{2,02} Si _{0,98} O ₅
9	62,98	0,04	0,21	–	0,03	99,78	Al _{2,01} Si _{0,99} O ₅
10	62,84	0,02	0,26	0,02	0,04	99,84	Al _{2,01} Si _{0,99} O ₅
11	63,16	0,03	0,20	0,01	0,04	99,98	Al _{2,01} Si _{0,99} O ₅

Хлоритоид-кианитовые сланцы выявлены в Приангарском метаморфическом комплексе [Шибистов, 2002] (см. рис. 10). Развиты они локально в бассейне нижнего течения р. Ангара в сланцах свиты Сухого хребта неопротерозоя. Ширина зоны метапелитов, содержащих кианит и хлоритоид, включающих участки гранулированного кварца (по кварцевым песчаникам), составляет порядка 2 км. Зона их распространения в юго-западном направлении прослежена буровыми работами глубинного геологического картирования, где на простирании зоны «кианита» скважиной 176 вскрыты перспективные слюдяные кианит-гранат-ставролитовые кристаллические сланцы с жилами гранулированного кварца (мощность жил около 30 см) с крупными (до 5 см) кристаллами кианита.

Гранат-ставролитовые кристаллические сланцы (Тасеевское рудопроявление) выявлены в Приангарском метаморфическом комплексе в Кулаковском поднятии в правобережье нижнего течения р. Тасеевой (район пос. Слюдорудник) (см. рис. 10). Площади распространения ВГС приурочены к зоне ставролита высокоглиноземистых метапелитов сухопитской серии мезопротерозоя эпидот-амфиболитовой фации *LP/HT* метаморфизма. Кристаллические сланцы богаты крупными (3–5 см) порфиروбластами ставролита (до 40–50 об. % в породе). По химическому составу (мас. %) железисто-глиноземистые метапелиты содержат $\text{SiO}_2 = 57,91\text{--}50,98$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 = 22,39\text{--}27,95$, а состав их протолита отвечает железисто-глиноземистым глинам каолинитового состава [Likhanov, Reverdatto, 2008]. Практический интерес к ставролитовым сланцам может быть вызван их использованием в качестве нерудного природного сырья для ускорения процессов шлакообразования и десульфурации металла, разжижающих добавок в черной металлургии. Применение ставролитовых сланцев как флюса в алюминиевой металлургии требует проведения экспериментальных исследований.

Возможные пути вовлечения ВГС и глиноземсодержащих пород региона в металлургическое производство в Приангарье

Проанализируем возможные варианты переработки высокоглиноземистого сырья и возможности создания на их базе с применением новых технологий промышленных производств глинозема, силимина и алюминия. Ранее показаны перспективы использования комплексных безотходных руд – железоалюминиевого сырья (железистых бокситов, глиноземистых железных руд), которое пригодно для производства ферросилиция, глинозема и высокока-

чественного цементного сырья [Одокий, Воропаева, Леоненко, 1988; Жабин, 2012]. Однако не все алюможелезистые руды могут быть пригодны напрямую для комплексной переработки, поэтому требуется составление шихты с оптимальными параметрами железоалюминиевого сырья. Специализированными работами доказано, что для такой шихты в качестве добавок могут быть использованы также высокоглиноземистые сланцы, хлоритоид [Жабин, 2012], нефелиновые сиениты [Лепезин, Семин, 1989] и другие руды. В пределах Северо-Енисейского края кроме МГС (андалузит, силлиманит, кианит) могут быть использованы такие глиноземсодержащие руды, как бокситы, глиноземистые железные руды и нефелиновые сиениты [Лепезин, Семин, 1989].

Характеристика месторождений бокситов, алюминиевых железных руд и нефелиновых сиенитов

Особенно остро проблема дефицита глиноземного сырья стоит перед сибирскими заводами. В качестве перспективных в районе БоАЗ (рис. 10) могут рассматриваться два рудных района в правобережье р. Ангара: Чадобецкий бокситовый (1) и Приангарский бокситовый и алюминиевых железных руд (2) [Жабин, 2012]. Бокситы применительно к данному региону не могут рассматриваться единственным перспективным сырьем прежде всего в силу ограниченных их запасов.

Чадобецкий бокситовый район. В перспективе основным отечественным сырьем для производства алюминия предполагается использовать местные железистые бокситы – комплексное безотходное железоалюминиевое сырье Чадобецкой структуры [Шибистов, 2002; Жабин, 2012]. Поэтому охарактеризуем этот район более подробно.

К числу пригодных для промышленной эксплуатации вблизи БоАЗ относится Чадобецкая группа месторождений, в которую входят месторождение Центральное котловинного типа, месторождения Ибджибек и Пуня карстового происхождения с общими запасами бокситов в 47,9 млн т, а также ряд рудопроявлений: Теринское, Огонь-Наки-тинское, Окуминское, Ламнанское, Полподское и Горелое. Все они находятся в Богучанском районе на Чадобецком поднятии Сибирской платформы вблизи БоАЗ. Большая часть их запасов (около 84 %) сосредоточена в Центральном месторождении, где выявлено 29 рудных тел, из которых 16 являются промышленными [Шибистов, 2002].

Месторождение Центральное находится в среднем течении р. Терины, расположено в 120 км

к северо-востоку от поселка Богучаны. Оно открыто в 1960 г., в 1962–1964 гг. проведена предварительная, а в 1967–1979 гг. детальная его разведка. Продуктивные отложения представлены бокситами, бурыми железняками, глинами. Минералогический состав бокситов: гиббсит, бемит, гетит, гематит, маггемит, магнетит. Среднее содержание Al_2O_3 в них равно 35,94 мас. %, $\text{SiO}_2 = 6,64$, $\text{TiO}_2 = 8,4$. В отличие от других месторождений бокситы здесь имеют сложный минералогический состав (об. %), содержат много оксида железа (30–40), TiO_2 до 10 % и соединений фосфора до 1,3 %.

Месторождение Ибджибдек открыто в 1961 г., находится в нижнем течении одноименного ручья, в 170 км на СВ от пос. Богучаны. В структурном плане оно приурочено к ЮЗ крылу Чадобецкого поднятия. По особенностям геологического строения сходно с месторождением Пуня. Мощность бокситоносных горизонтов составляет в среднем 35 м. Промышленное значение имеют восемь залежей, удаленных друг от друга на 100–1 050 м. Форма рудных тел линзовидная, реже гнездобразная. Рудные тела сложены каменистыми (24 % от общей массы руды), рыхлыми (34 %) и глинистыми (38 %) бокситами. По минералогическому составу они гиббситовые.

Месторождение Пуня расположено на водоразделе р. Пуня и руч. Огня, на южном склоне высоты с отметкой 346 м в 180 км на СВ от пос. Богучаны. Выявлено 10 промышленных залежей, локализуемых в карстовых воронках, вытянутых в меридиональном направлении.

В качестве железистой составляющей к чадобецким бокситам возможно использование гематитовых руд Чуктуконского рудопроявления [Жабин, 2012].

Чадобецкие бокситы традиционно рассматривались как обычное алюминиевое сырье. Исходя из этого осуществлялась и общая оценка их качества. В свое время Ангарской геологоразведочной экспедицией с Центрального месторождения была отобрана для технологических исследований крупнообъемная проба боксита (50 т) следующего химического состава (мас. %): $\text{Al}_2\text{O}_3 = 35,8$; $\text{SiO}_2 = 4,8$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 29,8$; $\text{TiO}_2 = 7,7$; $\text{Na}_2\text{O} = 0,18$; $\text{P}_2\text{O}_5 = 1,3$; $\text{CO}_2 = 0,11$; п.п.п. = 19,52. Кроме того бокситы содержат редкие элементы (Sr, Nb, Ce, Y, Be, Cr, Zr, Ga, V). Чадобецкие бокситы характеризуются повышенным содержанием оксида железа, поэтому метод Байера и спекания к ним не применим.

Поиск рациональной технологической схемы переработки бокситов на глинозем проводился в Красноярской государственной академии цветных металлов и золота и на заводе «Сибэлектросталь» в 1963 г. [Семин, Пономаренко, Крут, 1968]. В дальнейшем работы были продолжены совместно с Уральским

политехническим институтом (г. Свердловск) [Кузнецов, Медведев, 1978]. Исследование возможностей комплексной переработки Чадобецких бокситов Центрального месторождения электротермическим методом проводились в 1989–1990 гг. СНИИГТиМСом и ГПП «Красноярскгеология». Установлена возможность совместной переработки данных типов сырья на чугун и глинозем с хорошими технико-экономическими показателями. Кроме того, при выщелачивании бокситов при $T = 105\text{--}125^\circ\text{C}$ происходит концентрирование в 1,5–2 раза редких элементов в красном шламе, так как все они, кроме галлия, не растворяются в щелочных растворах. Накапливаясь в оборотных щелочных растворах до определенной концентрации, галлий может быть выделен из них известными способами [Жабин, 2012].

Таким образом, основным источником редких элементов при комплексной переработке чадобецких бокситов являются красные шламы. Наиболее трудная операция в их переработке – это выделение железа. Ввиду того, что оксид железа в красном шламе находится в тонкодисперсной форме и тесном взаимопроращении с другими составляющими шлама, эффективное отделение железа возможно только восстановительной электроплавкой красного шлама [Семин, Пономаренко, Крут, 1968], при этом получают второй товарный продукт – чугун, а содержание редких элементов в шлаках после их дополнительной обработки может быть увеличено в 3–4 раза по сравнению с содержанием их в исходном сырье. Предварительные расчеты показали, что при комплексной переработке чадобецких бокситов на глинозем, чугун, диоксид титана и оксиды редких и редкоземельных металлов общая стоимость товарной продукции по сравнению с реализуемой по традиционной технологии резко возрастает, а предприятие, осуществляющее комплексную переработку бокситов, будет высокорентабельным.

Приангарский район бокситов и алюминиевых железных руд. Составляющими железоалюминиевого сырья в районе являются железистые бокситы Иркинское выступ (Порожнинское, Киргитейское, Иркинское и Верхотурское) и глиноземистые гематитовые руды Ангаро-Питского синклинария (Нижнеангарское, Ишимбинское и Удоронгское месторождения) [Юдин, 1968]. Утвержденные запасы месторождений в Государственном комитете по запасам и химический состав руд охарактеризованы в [Жабин, 2012]. Железистые бокситы рассматриваются как глиноземистая добавка к гематитовым рудам при составлении железоалюминиевой шихты.

Нефелиновые сиениты. Поисковые работы на высокоглиноземистое сырье в Заангарье возобновились в 1978 г. в связи с расширением сырьевой базы Ачин-

ского глиноземного комбината. Основанием для этого послужили работы Красноярского института цветных металлов по изучению совместной переработки нефелиновых руд и концентратов МГС. К этому времени в регионе были выявлены и разведаны Среднетатарский и Кийский массивы нефелиновых сиенитов.

Среднетатарское месторождение нефелиновых сиенитов расположено на водоразделе рек Татарка и Погромная в 30 км к ССВ от п. Новоангарск и представлено Северным и Южным выходами [Цельковский, 2004]. Рассмотрим его подробнее, так как это месторождение по расстоянию располагается ближе к БоАЗ. В непосредственной близости от месторождения проходит линия электропередач 110 кВ. Южнее объекта, в левобережье р. Ангара, находится пос. Новоангарск и пристань, предназначенная для отгрузки свинцово-цинковых концентратов Горевского горно-обогатительного комбината.

В пределах Северного выхода проводились геологоразведочные работы с проходкой канав, шурфов, копуш по сети близкой к 100×100 м и три профиля скважин колонкового бурения глубиной 100–300 м. По каталогу месторождений и проявлений Красноярского края оно обозначено как объект «Массив А № 100». В пределах месторождения выделены три участка: Центральный – сложен уртитом и ийолитами; Западный и Восточный представлены нефелиновыми сиенитами, причем Западный обладает наиболее качественными рудами с равномерным распределением полезных компонентов; он отнесен к месторождениям первой группы. Минералогический состав руд в пределах месторождения варьирует (об. %; в скобках по Западному участку): нефелин от 10 до 85 % (30,5 %), эгирин 4–30 % (4,5 %), полевые шпаты (альбит, микроклин, 65 %). Содержание глинозема в рудах (мас. %) 20–24 % (среднее 22,73 %), Na_2O = 3,1–11,1 %, K_2O = 4–6 % (табл. 4).

Продукты коры выветривания нефелиновых сиенитов имеют каолинит-галлуазитовый состав. Мощ-

ность зоны выветривания достигает 60 м, содержание Al_2O_3 = 32,2 мас. %. На месторождении отобраны две малые (вес по 100 кг) и одна большая (вес 100 т) технологические пробы. Характеристика минерального и химического состава руд, кор выветривания по сиенитам и технологических проб из Западного (проба № 10) и Восточного (проба № 11) участков Северного массива Среднетатарского месторождения нефелиновых сиенитов приведена в табл. 4. Характеристика руд и результаты лабораторных испытаний Всесоюзного алюминиево-магниевого института (ВАМИ) малых технологических проб отражены в табл. 5.

По заключению ВАМИ наиболее эффективной является гидрохимическая схема переработки тонкоизмельченных необогащенных руд. Технологическая проба весом 100 т подвержена неполным полужаводским испытаниям в лабораториях и опытном глиноземном цехе Канакерского алюминиевого завода (Армения). Химический анализ пробы (мас. %): SiO_2 = 56,52; Al_2O_3 = 23,84; TiO_2 = 0,13; Fe_2O_3 = 2,52; P_2O_5 = 0,046; CaO = 1,61; R_2O = 14,39; п.п.п. + H_2O = 1,71; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ = 4,16. Установлено, что извлечение глинозема из руды составляет 87,5–92,4 %, щелочей – 92,4 %, при этом достигается снижение кремниевого модуля в концентрате с 4,16 до 2,38. По результатам исследований отделом «Гипроалюминий» дано заключение, в котором рекомендовано для руд Среднетатарского месторождения при составлении технико-экономических обоснований и проектных кондиций использовать в качестве объекта-аналога показатели Ахтинского горно-химического комбината, сырьевой базой которого являются руды Тежарского месторождения Кавказа. Запасы нефелиновых сиенитов Северного тела до горизонта +132,5 м (урез воды в р. Татарке) по категории C1+C2 составляют 3,9 млрд т. Аналогичное по составу и строению Южное тело обладает прогнозными ресурсами руды по категории P1 около 1,5 млрд тонн.

Таблица 4

Характеристика минерального (об. %) и химического (мас. %) состава руд, кор выветривания по сиенитам и технологических проб из Западного и Восточного участков Северного массива Среднетатарского месторождения нефелиновых сиенитов по [Цельковский, 2004]

Table 4

Characteristics of the mineral (vol. %) and chemical (wt. %) composition of ores, weathering crusts based on syenites and technological samples from the western and eastern sections of the northern massif of the Srednetatarsk nepheline syenite deposit after [Tselykovsky, 2004]

Компонент	Средние содержания, об. %					
	Участки			Кора выветривания	Технологические пробы	
	Западный	Центральный	Восточный		№ 10	№ 11
1	2	3	4	5	6	7
Минеральный состав, об. %						
<i>Nph</i>	30,5	35–85	10–25	–	–	–
<i>Eg</i>	4,5	15–30	4–10	–	–	–
<i>Ab+Kfs</i>	65	0–20	65–85	–	–	–

Компонент	Средние содержания, об. %					
	Участки			Кора выветривания	Технологические пробы	
	Западный	Центральный	Восточный		№ 10	№ 11
Химический состав, мас. %						
SiO ₂	55,39	50,74	53,48	53,31	56,10	54,35
TiO ₂	0,17	1,5–4,0	2,79	0,49	0,12	54,35
Al ₂ O ₃	22,73	20,08	20,83	23,94	22,90	22,89
Fe ₂ O ₃	3,33	6,99	5,75	5,66	2,45	3,90
MnO	0,12	0,28	0,16	0,22	0,04	0,09
MgO	0,22	1,5–3,5	0,49	0,60	0,18	0,20
CaO	1,57	3–8	2,52	1,11	0,84	2,30
Na ₂ O	9,86	8,45	8,34	3,08	11,05	9,22
K ₂ O	5,91	4,10	4,05	4,61	4,61	5,38
П.п.п.	1,69	1,52	2,73	6,10	0,55	2,03
FeO	–	–	–	–	0,38	1,50
P ₂ O ₅	–	–	–	–	следы	следы
S	–	–	–	–	0,007	0,01
Ga	–	–	–	–	0,0048	0,0034
Cl	–	–	–	–	0,15	0,31

Таблица 5

Результаты лабораторных испытаний ВАМИ малых технологических проб нефелиновых сиенитов

Table 5

Results of laboratory tests by the All-Union Aluminum-Magnesium Institute of small technological samples of nepheline syenites

Метод переработки	Проект извлечения		Расход известняка на 1 т глинозема, т
	Al ₂ O ₃	Na ₂ O+K ₂ O	
Переработка концентрата после химического обогащения:			
по методу спекания	90,3–90,7	78,4–81,6	5,6
гидрохимический метод	93	95	2,9
гидрохимическая переработка необогащенной руды	92	90	5,4

Кийский массив нефелиновых сиенитов (возраст сиенитов ордовик–силур) расположен в приенисейской части Енисейского кряжа в 12 км выше устья р. Кия, правого притока р. Енисей, в 135 км к С-СЗ от райцентра и пристани на р. Енисей. Сравнительно со Среднетатарским месторождением этот объект значительно удален от БоАЗ. Нефелиновые сиениты его характеризуются относительно низким содержанием глинозема (20–22 мас. %). Поэтому перерабатывать их по технологии спекания, как это делается на Ачинском глиноземном комбинате, невозможно.

Вышеописанные особенности метаморфогенных и магматогенных глиноземистых и железисто-глиноземистых руд позволяют наметить перспективы производства глинозема по технологии спекания способом совместной переработки нефелиновых руд и концентратов МГС.

Нефелиновые сиениты характеризуются низким содержанием глинозема (до 23 мас. %), поэтому сами по себе они мало пригодны для производства глинозема по общепринятой технологии спекания, но их можно перерабатывать совместно с МГС. Та-

кой вариант ранее был предложен Г.Г. Лепезиным и В.Д. Семиным [1989] применительно к Ачинскому глиноземному комбинату. Добавление 30 % МГС (Al₂O₃ = 57 мас. %) к необогащенной нефелиновой породе (Al₂O₃ = 22 мас. %) поднимает количество глинозема в смеси до 32 мас. %. Наиболее качественные кольские нефелиновые руды имеют (мас. %): 28–29 % Al₂O₃, Кия-Шалтырские – 27 %, лучшие способы их обогащения дают 27–30 %, теоретическое содержание Al₂O₃ в нефелине 35,9 %. Если же смесь составить из 60 % концентрата МГС и 40 % нефелиновой руды, то доля Al₂O₃ в ней достигнет 43 мас. % и приблизится к его концентрации в бокситах. Практическая реализация данного предложения позволила бы использовать без обогащения нефелиновые руды с относительно низким содержанием глинозема.

Минералы группы силлиманита. В последние годы эта группа полиморфов Al₂SiO₅ приобретает все большее значение. Помимо производства огнеупоров, керамики, пропантов и другой высокотехнологичной продукции их можно использовать для полу-

чения силумина и алюминия [Лепезин, 1997; Лепезин, Горюнов, 1988; Лепезин и др., 2014]. Силумин – это сплав кремния и алюминия. В настоящее время его производят сплавлением электролитического алюминия и кристаллического кремния. Альтернативой данной технологии является электротермия. Детальный обзор становления и развития электротермии в России и мире в целом дан в [Салтыков, Баймаков, 2003]. Большой опыт исследований в этой области имеется в ВАМИ [Веригин, 1958; Калужский и др., 1978; Калужский, Добаткин, Гопиенко, 1980; Брусаков, Глазатов, Запщинский, 1987; Баймаков и др., 2007].

По многочисленным экспертным оценкам специалистов, такой способ получения силумина, а далее и алюминия, имеет следующие преимущества: 1) из производственного цикла исключается сложное и дорогостоящее производство глинозема, необходимое для электролитического получения алюминия;

2) мощность рудотермической печи намного выше мощности электролизера (одна печь производительностью в 10 тыс. т алюминия в год может заменить 30 электролизеров); 3) нет надобности преобразовывать переменный ток в постоянный, а это сокращает потери электроэнергии; 4) отпадает необходимость использовать фтористые соединения; 5) расход электроэнергии на единицу получаемой продукции снижается до 20 %, а ее себестоимость до 30 %; 6) капитальные затраты на строительство цеха с рудотермической печью на 30–40 % ниже капитальных затрат на строительство глиноземного и электролитического цехов.

Технико-экономические показатели электротермического способа получения алюминия и его сплавов по сравнению с электролитическим способом показаны в табл. 6. Производство силумина даже с использованием электролитического алюминия для разбавления дает значительный экономический эффект.

Таблица 6

Технико-экономические показатели электротермического способа получения алюминия и его сплавов по сравнению с электролитическим [Костюков, Киль, Никифоров, 1974], %

Table 6

Technical and economic indicators of the electrothermal method for producing aluminum and its alloys in comparison with the electrolytic one [Kostyukov, Kil, Nikiforov, 1974]

Показатель на 1 т продукта	Литейные алюминиевые сплавы	Деформируемые сплавы и алюминий	Силумин, получаемый разбавлением
Снижение кап. вложений	30–40	30–35	10–12
Снижение себестоимости	25–35	15–25	8–10
Снижение расхода электроэнергии	10–15		5–7
Повышение производительности труда	20–40		10

Технология электротермии ведет к снижению удельных и капитальных затрат. При этом доля их снижения напрямую зависит от единичной мощности рудотермической печи. Широкие перспективы ее увеличения открывает использование плазменного нагрева, который к предлагаемому способу производства алюминия и его сплавов позволяет: 1) получать высокие температуры при большой концентрации энергии в реакционном пространстве; 2) стабилизировать электрический режим работы печи при его независимости от электрических свойств шихты; 3) создавать высокое напряжение на плазменной дуге, позволяющее привлекать плазмотроны большей мощности при сравнительно небольшой силе тока; 4) работать в широком диапазоне температур в любой среде. При этом в качестве плазмобразующих могут использоваться аргон, водород, воздух, природный газ и их смеси.

По имеющимся публикациям, в случае применения плазмотрона в плавильном агрегате примерный расход электроэнергии составит 10–12 тыс. кВт/ч на

1 т кремний-алюминиевого сплава. Для сравнения отметим, что расход электроэнергии при электролитическом производстве 1 т алюминия превышает 15 тыс. кВт/ч.

Показательный пример преимущества электротермии дан в [Салтыков, Баймаков, 2003]. Ими проведены сравнительные расчеты экономической эффективности получения кремний-алюминиевых сплавов марок АК12М2МН и АК18 традиционным способом сплавления алюминия А0, А7 и кристаллического кремния и электротермическим методом из каолина и силлиманита. Рассмотрены следующие варианты: 1) для предприятий, имеющих собственное производство алюминия и кремния, снижение себестоимости 1 т сплавов, полученных электротермическим способом, в сравнении с синтетикой составит 90 долл. США; 2) для предприятий, имеющих собственное производство алюминия, но приобретающих кремний на рынке, аналогичный расчет дает снижение себестоимости на 150 долл. США; 3) для производителей сплавов, не имеющих собственных

производств алюминия и кремния, электротермический способ является наиболее предпочтительным и позволяет снизить себестоимость 1 т сплавов по сравнению с синтетикой на 214 долл. США. Эти примеры наглядно показывают экономические преимущества электротермического способа производства силикоалюминия по сравнению с ныне действующей технологией получения силумина плавлением электролитического алюминия и кремния.

Запасы чадобецких бокситов составляют 106,4 млн т при среднем содержании компонентов (мас. %): $\text{Al}_2\text{O}_3 = 29,14$; $\text{SiO}_2 = 11,70$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 32,68$; $\text{TiO}_2 = 8,66$; п.п.п. = 15,45. Месторождения бокситов подобного типа широко распространены в Нижнем Приангарье и Северо-Енисейском кряже (Туруханская, Татарская, Каменская, Приангарская группы и др.). Возможным источником глиноземистых железных руд в комплексном использовании всех видов сырья в перспективе могут рассматриваться месторождения осадочных железных руд (минерал гематит) Ангаро-Питского железорудного бассейна [Юдин, 1968] с запасами порядка 5 млрд т.

Заключение

На примере полиметаморфических комплексов высокоглиноземистых метапелитов Северо-Енисейского кряжа, характеризующихся присутствием полиморфов Al_2SiO_5 , обоснованы геологоструктурные, минералогическо-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. Отрицательным фактором при определении степени перспективности андалузитовых руд является низкотемпературный диафорез, проявленный вблизи гранитоидных массивов и в зонах разломов.

В Тейском метакомплексе установлены площади развития метапелитов регионального метаморфизма андалузит-силлиманитового типа, в пределах которых сосредоточены перспективные Панимбинское андалузитовое и Тейское силлиманитовое месторождения. Продукты наложенного кианит-силлиманитового типа метаморфизма в зоне надвигов образуют ряд биминеральных (андалузит-кианит) (Маяконское, Чиримбинское и др.) и полиминеральных (андалузит-кианит-силлиманит) (Во-

роговское, Ведугинское, Неразгаданное и др.) рудопроявлений. Наряду с многочисленными метаморфогенными проявлениями МГС в Северо-Енисейском кряже выявлены месторождения и рудопроявления и других высокоглиноземистых пород – хлоритоидных и гранат-ставролитовых сланцев, бокситов, глиноземистых железных руд и нефелиновых сиенитов. В перспективе метаморфогенные сланцы могут быть использованы как высокоглиноземистое сырье в комплексе с бокситами Чадобецкого, бокситами и глиноземистыми железными рудами Приангарского рудных районов и нефелиновыми рудами Среднетатарского и Кийского массивов.

Рассматривая транспортную инфраструктуру региона относительно вовлечения высокоглиноземистого сырья в промышленность, можно отметить, что Тейское и Панимбинское месторождения ВГС расположены северо-восточнее БоАЗ вблизи автодороги г. Енисейск (левый берег р. Енисей) – Брянка–Северо-Енисейск–Тяя, приблизительно в 400 и 300 км соответственно. Наиболее перспективной представляется доставка ВГС Панимбинского месторождения андалузита, расположенного на автодороге на расстояние около 200 км до правого берега р. Енисей, и далее баржами вверх по Енисею и Ангаре до Богучан (расстояние около 400 км). Тейское месторождение силлиманита, расположенное в 50 км западнее пос. Тяя, наиболее перспективное, но в плане его отработки менее экономично, так как для перевозки руд необходимо строительство дороги и моста через р. Тею.

БоАЗ расположен на левобережье р. Ангары в 40 км юго-западнее Богучан, тогда как месторождения и проявления МГС и другие объекты глиноземистого сырья (бокситы, глиноземистые железные руды, нефелиновые сиениты) находятся севернее р. Ангары. Удаленность их от БоАЗ создает определенные трудности в освоении перспективных объектов. В этом отношении актуальным является инвестиционный проект «Комплексное развитие Нижнего Приангарья» (2005), разработанный Институтом региональной политики, согласно которому проектируется инфраструктурное развитие региона.

Для транспортного обслуживания Богучанского алюминиевого завода, согласно принятой программы развития Нижнего Приангарья, на железнодорожной ветке Карабула–Решеты построена станция Пихтовая, которая соединяет железнодорожные пути общего пользования с путями БоАЗа. На первом этапе пропускная способность станции Пихтовая составит 1 млн т груза в год, затем будет увеличена до 2,1–2,2 млн т в год (260 вагонов/сут). Со временем развитие производственных мощностей и видов продукции завода потребует решения проблемы во-

влечения отечественного железосиликатного сырья и ВГС.

Таким образом, анализ ресурсной базы глиноземсодержащих полезных ископаемых региона показывает, что в Северо-Енисейском крае открыт ряд перспективных метаморфогенных объектов ВГС, образование которых генетически связано с тектоно-метаморфическими процессами гренвилльской и байкальской орогении. Слагающие их МГС (андалузит,

кианит, силлиманит), а также ВГС, содержащие ставролит и хлоритид, обладают достаточными ресурсами для их использования в промышленности совместно с разведанными месторождениями бокситов, глиноземистых железных руд и нефелиновых сиенитов. Реалистичность их вовлечения в металлургическое производство на БОАЗ на перспективу подтверждается принятием программ и проектов социально-экономического развития Приангарья.

Список источников

- 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.
- Баймаков А.Ю., Глазатов А.Н., Русаков М.Р., Салтыков А.М.** Электротермия в производстве алюминия и алюминиево-кремниевых сплавов // Цветные металлы. 2007. № 8. С. 68–73.
- Бандман Н.К.** Избранные труды и продолжение начатого. Новосибирск : Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2014. 447 с.
- Брусаков Ю.И., Глазатов А.Н., Запщинский И.С.** Изучение условий шлакообразования при электротермическом производстве алюминия-кремниевых сплавов // Труды ВАМИ. Интенсификация производства продукции из алюминия, кремния и их сплавов. Л. : Изд-во ВАМИ, 1987. Т. 111. С. 67–77.
- Веригин В.Н.** Электротермический способ получения алюминия и его сплавов // Труды Восточно-Сибирского филиала АН СССР. 1958. Т. 2, № 13. С. 72–86.
- Жабин В.В.** Перспективы укрепления и развития сырьевой базы алюминиевой промышленности Сибири за счет использования безотходного и экологически чистого железосиликатного сырья // Состояние и перспективы развития МСБ. 2012. № 4. С. 78–89.
- Калужский Н.А., Добаткин В.И., Гопиенко В.Г.** Перспективы электротермического производства алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 1980. № 1. С. 40–50.
- Калужский Н.А., Козлов В.М., Останин Ю.Д., Черняховский Л.В.** Использование плазменного нагрева для восстановления глиноземсодержащих материалов при получении алюминиевых сплавов // Труды ВАМИ. Литье и обработка алюминия. Ленинград: Изд-во ВАМИ, 1978. Т. 102. С. 59–63.
- Козлов П.С.** Проблемы петрологии и петрохимии андалузитовых сланцев Заангарья Енисейского края (на примере Панибинского месторождения) // Проблемы геологии и металлогении Красноярского края. Новосибирск : Наука, 1989. С. 89–100.
- Козлов П.С., Лепезин Г.Г.** Петрология, петрохимия и метаморфизм пород Заангарья Енисейского края // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. С. 3–22.
- 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 крае // Доклады Академии наук. 2006. Т. 408, № 4. С. 512–516.
- Костюков А.А., Киль И.Г., Никифоров В.П.** Справочник металлурга по цветным металлам. Производство алюминия. Разд. 5. М.: Металлургия, 1974. 560 с.
- Кузнецов С.И., Медведев Г.И.** Переработка высококремнистых продуктов обогащения чадобецких бокситов методом спекания // Цветная металлургия. 1978. № 4. С. 22–39.
- Лепезин Г.Г.** Месторождения и рудопроявления минералов группы силлиманита России и перспективы создания на их базе промышленного производства концентратов // Огнеупоры и техническая керамика. 1997. № 8. С. 27–32.
- Лепезин Г.Г.** Стратегия развития сырьевой базы алюминиевой промышленности России // Химия в интересах устойчивого развития. 2004. № 12. С. 511–516.
- Лепезин Г.Г.** Состояние сырьевой базы алюминиевой промышленности России и стратегия ее развития // Маркшейдерия и недропользование. 2005. № 2. С. 19–24.
- Лепезин Г.Г.** Минералы группы силлиманита – перспективный вид сырья для импортозамещения в огнеупорной отрасли России // Новые огнеупоры. 2016. № 5. С. 6–13.
- Лепезин Г.Г., Горюнов В.А.** Области применения минералов группы силлиманита. // Геология и геофизика. 1988. № 5. С. 80–87.
- Лепезин Г.Г., Семин В.Д.** Перспективы развития сырьевой базы алюминиевой промышленности Сибири // Геология и геофизика. 1989. № 2. С. 85–95.
- Лепезин Г.Г., Шерман М.Л., Семин В.Д., Кравцов И.С.** Перспективы использования метаморфических пород Алтае-Саянской складчатой области и Енисейского края как источника высокоглиноземистого сырья // Геология и геофизика. 1979. № 12. С. 35–43.
- Лепезин Г.Г., Каргополов С.А., Жиравковский В.А.** Минералы группы силлиманита как новое перспективное сырье для алюминиевой промышленности России // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 12. С. 1605–1617.

Лепезин Г.Г., Аньшаков А.С., Фалеев В.А., Аввакумов Е.Г., Винокурова О.Б. Плазмохимический способ получения силумина из минералов группы силлиманит // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. С. 110–113.

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. 301–312.

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. 2014. Т. 52, № 1. С. 3–25.

Лиханов И.И., Ревердатто В.В. Свидетельства полиметаморфической эволюции докембрийских геологических комплексов Заангарья Енисейского кряжа // Геосферные исследования. 2021. № 3. С. 19–41.

Лиханов И.И., Ревердатто В.В. Геохимия, обстановки формирования, состав и возраст протолита железисто-глиноземистых метapelитов Северо-Енисейского кряжа // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507, № 1. С. 46–55.

Лиханов И.И., Полянский О.П., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Вершинин А.Е., Кребс М., Мемми И. Метаморфическая эволюция высокоглиноземистых метapelитов вблизи Панинбинского надвига (Енисейский кряж): минеральные ассоциации, Р-Т 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 Р-Т 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. 2008. Т. 46, № 1. С. 20–41.

Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С. Коллизионные метаморфические комплексы Енисейского кряжа: особенности эволюции, возрастные рубежи и скорость экзгумации // 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., Зиновьев С.В. Неопротерозойский дайковый пояс Заангарья Енисейского кряжа как индикатор процессов растяжения и распада Родинии // Доклады Академии наук. 2013а. Т. 450, № 6. С. 685–690.

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. 2013б. Т. 450, № 3. С. 329–334.

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., Туркина О.М., Лиханов И.И., Дмитриева Н.В. Позднепалеопротерозойские вулканические ассоциации на юго-западе Сибирского кратона (Ангаро-Канский блок) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 2. С. 312–332.

Одокий Е.Н., Воропаева Н.П., Леоненко И.Н. Расширение минерально-сырьевой базы алюминиевой промышленности за счет комплексных железо-алюминиевых руд. Бокситы и другие руды алюминиевой промышленности. М.: Наука, 1988. С. 47–51.

Попов Н.В., Лиханов И.И., Ножкин А.Д. Мезопротерозойский гранитоидный магматизм в заангарской части Енисейского кряжа: результаты U-Pb исследований // Доклады Академии наук. 2010. Т. 431, № 4. С. 509–515.

Постельников Е.С. Вернепротерозойские структуры и формации восточного склона Енисейского кряжа // Бюллетень МОИП. 1990. Т. 65. С. 14–31.

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.

Салтыков А.М., Баймаков А.Ю. Становление и развитие электротермического производства алюминиево-кремниевых сплавов // Цветные металлы. 2003. № 7. С. 101–104.

Семян В.Д., Пономаренко В.В., Крут Ю.М. Комплексное использование высококремнистых железных бокситов и глиноземистых железных концентратов. Известия вузов // Цветная металлургия. 1968. № 1. С. 45–49.

Цельковский А.Ф. Геологическое доизучение масштаба 1 : 200 000 Горевского горнорудного района в пределах листов О-46–XV, VI (Усть-Ангарская площадь) (производственный отчет геологосъемочной группы за 1991–2000 гг.). Мотыгино, 2004. 303 с.

- Черкасов Г.Н.** Бокситы: методы генетических реконструкций и бокситовый потенциал России. Новосибирск : Изд-во СНИИГГиМС, 2015. 347 с.
- Шибистов Б.В.** Закономерности формирования и размещения континентальных бокситов : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Томск : ТПИ, 2002. 45 с.
- Юдин Н.И.** Литология железорудных месторождений Ангара-Питского бассейна. М. : Недра, 1968. 152 с.
- Ague J.J.** Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites // *Geology*. 1991. V. 19. P. 855–858.
- Chatterjee N.D., Johannes W.S.** Thermal stability and standard thermodynamic properties of synthetic $2M_1$ -muscovite, $KAl_2Al_3Si_3O_{10}(OH)_2$ // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1974. V. 48. P. 89–114.
- Haas H., Holdaway M.J.** Equilibria in the system Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O 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 Al_2SiO_5 polymorphs / *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*. 1990. V. 22. P. 406.
- 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. 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.
- 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. 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. P. 98–115.
- Likhanov I.I.** Provenance, Age and Tectonic Settings of Rock Complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): Geochemical and Geochronological Evidence // *Geosciences (Switzerland)*. 2022. V. 12 (11). P. 402.
- 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., 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., Memmi I.** Short-range mobilization of elements in the biotite zone of contact aureole of the Kharlovo gabbro massif (Russia) // *European Journal of Mineralogy*. 1994. V. 6 (1). P. 133–144.
- 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., 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.
- 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.
- 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.
- Whitney D.L., Evans B.W.** Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. 2010. V. 95. P. 185–187.

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 anatexis: the results of numerical simulation // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 486. No 6. pp. 704–708. In Russian
- Baymakov A.Y., Glazatov A.N., Rusakov M.R., Saltykov A.M. Electrothermics in the production of aluminum and aluminum-silicon alloys // *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous Metals]. 2007. No. 8. pp. 68–73. In Russian

- Bandman N.K. *Izbrannyye trudy i prodolzheniye nachatogo* [Selected Works and the Continuation of Initiated Works]. Novosibirsk: Publishing house IEOPP SB RAS, 2014. 447 p. In Russian
- Brusakov Y.I., Glazatov A.N., Zapschinsky I.S. *Izucheniye usloviy shlaкообразовaniya pri elektrotermicheskom proizvodstve alyuminiyevo-kremniyevykh splavov* [Study of slag formation conditions during electrothermal production of aluminum-silicon alloys] // *Trudy VAMI. Intensifikatsiya proizvodstva produktsii iz alyuminiya, kremniya i ikh splavov* [Proceedings of VAMI. Intensification of production of products from aluminum, silicon and their alloys]. Leningrad: VAMI Publ., 1987. No. 111. pp. 67–77. In Russian
- Verigin V.N. *Elektrotermicheskiy sposob polucheniya alyuminiya i yego splavov* [Electrothermal method for producing aluminum and its alloys] // *Trudy Vost.-Sib. Filiala AN SSSR* [Proceedings of East Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences]. Krasnoyarsk: EAB USSR AS Publ., 1958. V. 13. pp. 72–86. In Russian
- Zhabin V.V. *Perspektivy ukrepleniya i razvitiya syr'yevoy bazy alyuminiyevoy promyshlennosti Sibiri za schët ispol'zovaniya bezotkhodnogo i ekologicheskii chistogo zhelezoalyuminiyevogo syr'ya* [Development prospects of the mineral resource base of the aluminum industry of Siberia by using the non-waste and ecologically clean iron-aluminum raw material] // *Costoyaniye i perspektivy razvitiya MSB* [State and Development Perspectives of Mineral Resource Base]. 2012. No. 4. pp. 78–89. In Russian
- Kaluzhsky N.A., Dobatkin V.I., Gopienko V.G. *Perspektivy elektrotermicheskogo proizvodstva alyuminiyevykh splavov* [Prospects for electrothermal production of aluminum alloys] // *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous Metals]. 1980. No. 1, pp. 40–50. In Russian
- Kaluzhsky N.A., Kozlov V.M., Ostanin Y.D., Chernyakhovskiy L.V. *Ispol'zovaniye plazmennogo nagreva dlya vosstanovleniya glinozemsoderzhashchikh materialov pri poluchenii alyuminiyevykh splavov* [The use of plasma heating for the reduction of alumina-containing materials in the production of aluminum alloys] // *Proceedings of VAMI. Casting and machining of aluminum*. Leningrad: VAMI Publ., 1978. No. 102. pp. 59–63. In Russian
- Kozlov P.S. *Problemy petrologii i petrokhimii andaluzitovykh slantsev Zaangar'ya Yeniseyskogo kryazha (na primere Panimbinskogo mestorozhdeniya)* [Problems of petrology and petrochemistry of the andalusite shales of the Transangarian Yenisei Ridge (on the example of the Panimba deposit)] // *Problems of Geology and Metallogeny of the Krasnoyarsk Territory*. Novosibirsk: Nauka, 1989, pp. 89–100. In Russian
- Kozlov P.S., Lepezin G.G. *Petrologiya, petrokhiymiya i metamorfizm porod Zaangar'ya Eniseyskogo kryazha* [Petrology, petrochemistry and metamorphism of the Transangarian rocks of the Yenisei Ridge] // *Geologiya i Geofizika*. 1995. V. 44. pp. 3–22. In Russian
- Kozlov P.S., Likhanov I.I., Zinoviev S.V., Khiller V.V. Priangarsky metamorphic complex (Yenisei Ridge): geological features, P–T conditions and age of metamorphism // *Litosfera*. 2014. No 6. pp. 141–149. In Russian
- 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. 62–78. In Russian
- 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. 512–516. In Russian
- Kostyukov A.A., Kil I.G., Nikiforov V.P. *Spravochnik metallurga po tsvetnym metallam. Proizvodstvo alyuminiya* [Reference book of metallurgist on non-ferrous metals. Aluminum production]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1974. 560 p. In Russian
- Kuznetsov S.I., Medvedev G.L. *Pererabotka vysoko-kremnistykh produktov obogashcheniya chadobetskikh boksitov metodom spekaniya* [Processing of high-siliceous products of enrichment of Chadobets bauxites by the sintering method] // *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous Metals]. 1978. No. 4, pp. 22–39. In Russian
- Lepezin G.G. *Mestorozhdeniya i rudoproyavleniya mineralov gruppy sillimanita Rossii i perspektivy sozdaniya na ikh baze promyshlennogo proizvodstva kontsentratorov* [Deposits and ore occurrences of minerals of the sillimanite group of Russia and the prospects for creating industrial production of concentrates on their basis] // *Ogneupory and technical ceramics* [Refractories and Industrial Ceramics]. 1997. No. 8. pp. 27–32. In Russian
- Lepezin G.G. *Strategiya razvitiya syr'yevoy bazy alyuminiyevoy prmyshlennosti Rossii* [Development strategy for the raw material base of the aluminum industry in Russia] // *Chemistry for sustainable development*. 2004. No. 12. pp. 511–516. In Russian
- Lepezin G.G. *Sostoyaniye syr'yevoy bazy alyuminiyevoy promyshlennosti Rossii i strategiya yeye razvitiya* [The state of the raw material base of the aluminum industry in Russia and the strategy of its development] // *Marksheyderiya i nedropol'zovaniye* [Mine surveying and subsoil use]. 2005. No. 2. pp. 19–24. In Russian
- Lepezin G.G. *Mineraly gruppy sillimanita – perspektivnyy vid syr'ya dlya importozameshcheniya v ogneupornoy otrasli Rossii* [Minerals of the sillimanite group – a promising type of raw material for import substitution in the refractory industry of Russia] // *Novyye ogneupory* [New refractories]. 2016. No. 5. pp. 6–13. In Russian
- Lepezin G.G., Goryunov V.A. Applications of minerals of the sillimanite group // *Geologiya i Geofizika*. 1988. V. 29. pp. 80–87. In Russian
- Lepezin G.G., Semin V.D. Prospects for the development of the raw material base of the aluminum industry in Siberia // *Geologiya i Geofizika*. 1989. V. 30. pp. 85–95. In Russian
- Lepezin G.G., Sherman M.L., Semin V.D., Kravtsov I.S. Prospects for the use of metamorphic rocks of the Altai-Sayan folded region and the Yenisei ridge as a source of high-alumina raw materials // *Geologiya i Geofizika*. 1979. V. 20. pp. 35–43. 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. 1605–1617. In Russian
- Lepezin G.G., Anshakov A.S., Faleev V.A., Avvakumov E.G., Vinokurova O.B. Plasma-chemical method of obtaining silumin from minerals of the sillimanite group // *Doklady Earth Sciences*. 2014. V. 456. pp. 110–113. In Russian
- Likhanov I.I. Mineral reactions in high-alumina ferriiferous 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. 4–16. In Russian
- Likhanov I.I. Instability of Al₂SiO₅ “triple point” assemblages as a consequence of polymetamorphism in Al-rich metapelites // *Petrology*. 2020. V. 28. No 6. pp. 610–627. In Russian

- 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. 239–267. In Russian
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. Geochemistry, age and petrogenesis of rocks from the Garevka metamorphic complex, Yenisey Ridge // *Geochemistry International*. 2014. V. 52. No 1. pp. 3–25. In Russian
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. Evidence for polymetamorphic evolution of the Precambrian geological complexes of the Transangarian Yenisei Ridge // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2021. No 3. pp. 19–41. In Russian
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V. Geochemistry, formation settings, composition and age of the protolith for the Fe- and Al-rich metapelites of the North Yenisei Ridge // *Doklady Earth Sciences*. 2022. V. 507. No. 1. pp. 891–899. In Russian
- 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. In Russian
- 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 $_2$ O) // *Petrology*. 2005. V. 13. No 1. pp. 81–92. In Russian
- 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 2. pp. 235–239. In Russian
- 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. 412. No. 6. pp. 799–803. In Russian
- 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*. 2008. V. 46. No. 1. pp. 20–41. In Russian
- 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. 1593–1611. In Russian
- 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. 4. pp. 509–514. In Russian
- 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. 607–614. In Russian
- 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*. 2013a. V. 450. No 2. pp. 685–690. In Russian
- 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*. 2013b. V. 450. No 3. pp. 329–334. In Russian
- 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. 32–53. In Russian
- 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. 423–440. In Russian
- 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. 28–51. In Russian
- Likhanov I.I., Zinoviev S.V., Kozlov P.S., Blastomylonite complexes of the western Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia): geological position, metamorphic evolution, and geodynamic models // *Geotectonics*. 2021. V. 55. No. 1, pp. 41–65. In Russian
- Nozhkin A.D., Turkina O.M., Likhanov I.I., Dmitrieva N.V. Late Paleoproterozoic volcanic associations in the southwestern Siberian craton (Angara-Kan block) // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. V. 57. No. 2. pp. 312–332. In Russian
- Odokiy E.N., Voropaeva N.P., Leonenko I.N. *Rasshireniye mineral'no-syr'yevoy bazy alyuminiyevoy promyshlennosti za schet kompleksnykh zhelezo-alyuminiyevykh rud* [Expansion of the mineral and raw materials base of the aluminum industry at the expense of complex iron-aluminum ores] // *Bauxites and other ores of the aluminum industry*. Moscow: Nauka, 1988. pp. 47–51. In Russian
- Popov N.V., Likhanov I.I., Nozhkin A.D. Mesoproterozoic granitoid magmatism in the Trans-Angara Segment of the Yenisei Range: U-Pb evidence // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 431. pp. 509–515. In Russian
- Postelnikov E.S. *Verkhneproterozoiyskiye struktury i formatsii vostochnogo sklona Yeniseyskogo kryazha* [Upper Proterozoic structures and formations of the eastern slope of the Yenisei Ridge] // *Bull. MOIP. Dept. geol.* 1990. V. 65. pp. 14–31. In Russian
- 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
- Saltykov A.M., Baimakov A.Y. Formation and development of electrothermal production of aluminum-silicon alloys // *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous Metals]. 2003. No. 7. pp. 101–104. In Russian
- Semin V.D., Ponomarenko V.V., Krut Y.M. *Kompleksnoye ispol'zovaniye vysokokremnistykh zheleznykh boksitov i glinozemistykh zheleznykh kontsentratsiy* [Complex use of high-siliceous iron bauxite and aluminous iron concentrates] // *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy]. 1968. No. 1. pp. 45–49. In Russian
- Tselykovsky A.F. *Geologicheskoye doizucheniye masshtaba 1:200 000 Gorevskogo gornorudnogo rayona v predelakh listov O-46-XV, VI (Ust'-Angarskaya ploshchad') (proizvodstvennyy otchot geologov "yomochnoy gruppy za 1991–2000 gg.)* [Additional geological exploration on a scale of 1: 200 000 of the Gorevsky mining region within sheets O-46-XV, VI (Ust'-Angarskaya area) (production report of the geological survey group for 1991–2000)]. Motygin, 2004. 303 p. In Russian
- Cherkasov G.N. *Boksity: metody geneticheskikh rekonstruktsiy i boksitovyy potentsial Rossii* [Bauxites: methods of genetic reconstruction and bauxite potential of Russia]. Novosibirsk: Publishing house SNIIGIMS, 2015. 347 p. In Russian
- Shibistov B.V. *Zakonovernosti formirovaniya i razmeshcheniya kontinental'nykh boksitov* [Regularities of the formation and distribution of continental bauxites]: Avtorefer. dis. doct. geol.-miner. nauk. Tomsk, 2002. 45 p. In Russian
- Yudin N.I. *Litologiya zhelezorudnykh mestorozhdeniy Angaro-Pitskogo basseyna* [Lithology of iron ore deposits in the Angara-Pitsky basin]. Moscow: Nedra, 1968. 152 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.
- Chatterjee N.D., Johannes W.S. Thermal stability and standard thermodynamic properties of synthetic $2M_1$ -muscovite, $KAl_2Al_3Si_3O_{10}[OH]_2$ // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1974. V. 48. pp. 89–114.
- Haas H., Holdaway M.J. Equilibria in the system Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O 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.
- 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. 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.
- 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. Provenance, Age and Tectonic Settings of Rock Complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): Geochemical and Geochronological Evidence // *Geosciences (Switzerland)*. 2022. V. 12(11). 402.
- 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. Neoproterozoic collisional metamorphism in overthrust terranes of the Transangarian Yenisey Ridge, Siberia // *International Geology Review*. 2011. V. 53. pp. 802–845.
- 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., 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., 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. pp. 597–623.
- 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.
- 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.
- 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.
- Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. 2010. V. 95. pp. 185–187.

Информация об авторах:

Козлов П.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория региональной геологии и тектоники, Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: kozlov@igg.uran.ru

Лиханов И.И., 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

Ревердатто В.В., 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

Сухоруков В.П., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией прогнозно-металлогенических исследований, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.
E-mail: svp@igm.nsc.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kozlov P.S., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Research Fellow, Laboratory of regional geology and tectonics, A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UrB RAS, Ekaterinburg, Russia
E-mail: likh@igm.nsc.ru

Likhanov I.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 V.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

Sukhorukov V.P., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), head of Laboratory of predictive metallogenic research, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: svp@igm.nsc.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.11.2021; одобрена после рецензирования 15.01.2022; принята к публикации 06.11.2022

The article was submitted 11.11.2021; approved after reviewing 15.01.2022; accepted for publication 06.11.2022