

УДК 551.72; 551.24.056

## ПРИАНГАРСКИЙ МЕТАМОРФИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ): ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИИ, *P-T* УСЛОВИЯ И ВОЗРАСТ МЕТАМОРФИЗМА

© 2014 г. П. С. Козлов\*, И. И. Лиханов\*\*, С. В. Зиновьев\*\*.,\*\*\*, В. В. Хиллер\*

\*Институт геологии и геохимии УрО РАН  
620075, г. Екатеринбург, Почтовый пер., 7  
E-mail: khiller@igg.uran.ru

\*\*Институт геологии и минералогии СО РАН  
630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3

\*\*\*Новосибирский государственный университет  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 26.06.2014 г.

Предпринято изучение метаморфических пород в зоне сочленения мезо-неопротерозойских структур Заангарья с архей?-палеопротерозойскими комплексами Ангаро-Канского выступа Енисейского кряжа. Интерпретация новых геологических, петрологических и геохронологических данных позволила выделить Приангарский метаморфический комплекс (ПМК). Он включает в себя проявления раннего прогрессивного зонального метаморфизма андалузит-силлиманитовой фациальной серии (1100–850 млн лет) по осадочным и вулканогенно-осадочным толщам сухопитской серии. Позднее (730–600 млн лет) эти породы локально подверглись кианит-силлиманитовому метаморфизму в зонах, приуроченных к Ишимбинско-Татарской системе разломов. По времени деформационно-метаморфических событий и стилю метаморфизма ПМК хорошо коррелирует с Тейским полиметаморфическим комплексом Заангарья. Ранний этап эволюции региона связывается с гренвильской тектоникой, поздний – с аккреционно-коллизионными процессами формирования предвенд-вендских регионально-сдвиговых зон и завершением неопротерозойской эволюции орогена в юго-западном обрамлении Сибирского кратона.

Ключевые слова: *глубинное геокартирование, метаморфизм, геотермобарометрия, геохронология, Приангарский метаморфический комплекс, Енисейский кряж.*

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ РЕГИОНА

Енисейский кряж, представляющий собой докембрийскую складчатую область в пределах западной окраины Сибирского кратона, является одним из наиболее интересных в геодинамическом аспекте регионов Сибири. Здесь обнажается достаточно представительный разрез докембрия от палеопротерозоя до конца неопротерозоя (эдиакария) включительно. Реконструкция его геологической истории важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов в обрамлении древних кратонов, но и для решения вопроса о вхождении Сибирского кратона в состав древних суперконтинентов Нуны (Колумбия) и Родинии. Согласно некоторым моделям, построенным на эволюции гранитоидного магматизма [2], докембрийский складчато-надвиговый пояс Енисейского кряжа образовался после 0.76 млрд лет назад в результате последовательной аккреции нескольких террейнов к западной окраине Сибирского кратона. В последние годы нами получены новые результаты по геологии Енисейского кряжа, свидетельствующие о проявлении гренвильских событий в интер-

вале 1.1–0.85 млрд лет в Заангарской [5, 12–15, 18] и Ангаро-Канской [17] частях. В качестве объекта исследования выбрана область сочленения структур южной части Центрального сегмента Заангарья и Южно-Енисейского блока (врезка на рис. 1) [11], слабоизученная в отношении *P-T* условий и возраста метаморфизма. Она располагается в междуречье Ангары, Енисея, Тасеевой и Бол. Сполошной и перекрыта мощным неметаморфизованным чехлом осадочных пород фанерозоя (до 200 м и более).

В геологическом строении региона принимают участие преимущественно осадочно-метаморфические метаалевропелиты сухопитской серии мезопротерозоя (см. рис. 1). Особенности геологического строения района исследования – присутствие в разрезе позднего неопротерозоя неоднородно метаморфизованных метакarbonатных пород горевской свиты (по мере усиления степени метаморфизма “усть-ангарский”, “горевский” и “погромнинский” типы) и метапелит-метапсаммитовых терригенных пород свиты Сухого хребта, относящихся к широкинской серии [9]. Метакarbonаты горевской свиты залегают несогласно на разных горизонтах сухопитской серии.



**Рис. 1.** Схема геологического строения Приангарского метаморфического комплекса Енисейского кряжа (составил П.С. Козлов с использованием материалов Ангарской геологоразведочной экспедиции ПГО “Красноярскгеология”).

1 – неметаморфизованные осадочные породы платформенного чехла ( $D_3-C_1$ ), претерпевшие диагенез; 2–8 – Приангарский метаморфический комплекс (ПМК) ( $R_3$ ), фации метаморфизма: 2–4 – фация зеленых сланцев: 2 – не расчленена по температуре, 3 – серицит-хлоритовая и серицит-хлоритоидная субфации, нерасчлененные, здесь и далее: установленные (а, левая часть прямоугольника) и предполагаемые под неметаморфизованным чехлом (б, правая часть прямоугольника), 4 – мусковит-биотитовая субфация; 5 – эпидот-амфиболитовая фация; 6 – амфиболитовая фация; 7–8 – метаморфические комплексы Ангаро-Канского выступа ( $AR_1-PR_1$ ), предполагаемые по геофизическим и геологическим данным: 7 – гранулитовая и амфиболитовая фации нерасчлененные, 8 – гранулитовая фация; 9–23 – реконструированный литологический состав метабазитов ( $R_{2-3}$ ): 9–11 – свита Сухого хребта ( $R_3$ ): 9 – алевропелиты и песчаники, 10 – кварцевые алевролиты, 11 – пелиты слабоуглеродистые; 12–15 – горевская свита, карбонатные породы с прослоями пелитового состава: 12 – с пиритом (“уст-ангарский” тип), 13 – кристаллические с пирротином, сидериты (“горевский” тип), 14 – кристаллические и слабоаморфизованные с пирротином (“погромнинский” тип), 15 – алевролиты углеродистые; 16–18 – морянихинская свита ( $R_3$ ): 16 – высокоглиноземистые пелиты в переслаивании с алевролитами, 17 – пелиты в переслаивании с карбонатами, 18 – доломиты; 19 – пикрит-базальтовая толща: карбонаты, пикриты, базальты ( $R_3$ ); 20 – погорюйская свита ( $R_2$ ): переслаивание кварцевых алевролитов, песчаников и пелитов; 21 – удерейская и горбилковская свиты ( $R_2$ ) – пелиты; 22–23 – высокометаморфизованные толщи дорифейского основания ( $AR_1-PR_1$ ): 22 – веснинская (метакarbonаты, гнейсы), 23 – кузевская (гнейсы, чарнокиты); 24–28 – магматические комплексы: 24 – среднетатарский нефелиновых сиенитов, 25 – ареал развития даек базитов поздней фазы ведугинского комплекса, 26 – глушихинский гранитов, 27 – посольненский (тейский) гнейсо – гранитов, 28 – кимбирский габбро, норитов и анортозитов; 29–32 – формационные типы стратиформных полиметаллических руд: 29–31 – свинцово-цинковый, 29 – в рифогенных карбонатах (“морьянихинский” тип), 30 – в вулканогенно-карбонатных породах (“степановский” тип), 31 – в кремнисто-карбонатных породах (“горевский” тип); 32 – колчеданно-полиметаллический в кремнисто-углеродистых породах (“рассохинский” тип); 33 – границы фаций; 34 – изограды индекс-минералов регионального метаморфизма андалузит-силлиманитового типа (1100–850 млн лет): биотита (а), альмандина (б), амфибола (в), ставролита (г), андалузита, предполагаемая под неметаморфизованным чехлом (д); 35–37 – изограды индекс-минералов и локальное проявление динамометаморфизма дистен-силлиманитового типа (620–600 млн лет): 35 – изограда биотита, 36 – ареал локального развития альмандина (Горевский рудоконтролирующий разлом), 37 – бластомилониты ильменит-хлоритоидные, хлоритоидно-дистеновые (а) и гранат-дистен – ставролитовые (б) Татарской зоны смятия; 38 – контактовые роговики, скарны; 39 – региональные разломы (I – Татарский, II – Кулаковский); 40 – прочие разломы; 41 – надвиги; 42 – геологические границы: установленные (а), предполагаемые (б); 43 – площади распространения фанерозойских образований неметаморфизованного чехла (Погромнинская, Кулаковская и Казачинская котловины); 44 – контур глубинного геологического картирования масштаба 1 : 200 000. На врезке: положение ПМК в тектонической структуре региона.

**Fig. 1.** The scheme of the geological structure Cisangarian metamorphic complex of the Yenisei Ridge (made by P.S. Kozlov with using materials of deep geological mapping of 1 : 200 000 by Angarsk Geological Expedition PGO “Krasnoyarskgeologiya”).

1 – unmetamorphosed sedimentary rocks of the platform cover, underwent diagenesis ( $D_3-C_1$ ); 2–8 – Cisangarian metamorphic complex ( $R_3$ ), metamorphic facies, 2–4 – greenschist: 2 – not separated in temperature, 3 – muscovite-chlorite and muscovite-chloritoid subfacies undivided, here and further: established (a and left part of rectangle), expected under the unmetamorphosed cover of platform (b and right part of rectangle), 4 – muscovite-biotite subfacies; 5 – epidote-amphibolite facies; 6 – amphibolite facies; 7–8 – metamorphic complexes of the Angara-Kan basement high ( $AR_1-PR_1$ ), supposed by geophysical and geological data, 7 – granulite and amphibolite facies undivided, 8 – granulite facies; 9–23 – reconstructed lithology of rocks ( $R_{2-3}$ ): 9–11 – Sukhoi khibet formation ( $R_3$ ): 9 – aleuropelites and sandstones (a-b), 10 – quartz siltstone, 11 – pelites with low carbon content; 12–15 – Gorevka formation – carbonate rocks interbedded with pelites: 12 – with pyrite (“ust-angara” type), 13 – crystalline rocks with pyrrhotine, siderite (“gorevsky” type), 14 – crystalline rocks with pyrrhotine (“pogromninsky” type), 15 – carbonaceous siltstones; 16–18 – Moryanikhinskaya formation: 16 – high-aluminium pelites interbedded with siltstone, 17 – pelites interbedded with carbonates, 18 – dolomites; 19 – picrite-basalt series: carbonates, picrites, basalts ( $R_3$ ); 20 – Pogoryuy formation ( $R_2$ ): interbedded quartz siltstones, sandstones and pelites; 21 – Uderey and Gorbilok formations ( $R_2$ ): pelites; 22–23 – high-metamorphosed rocks of the pre-Riphean protolith ( $AR_1-PR_1$ ): 22 – Vesninskaya series (metamorphosed carbonates, gneisses), 23 – Kuzeevskaya series (gneisses, charnokites); 24–28 – Igneous complexes: 24 – srednetatarsky (nepheline syenites), 25 – veduga (mafic dikes), 26 – glu-shikha (granites), 27 – posolnensky (gneiss-granite), 28 – kimbirsky (gabbro, norite and anorthosite) complexes; 29–32 – Formational types of stratiform lead-zinc ores: 29 – in the rift related carbonates (“moryanikhinsky” type), 30 – in the volcanic-carbonate rocks (“stepanovsky” type), 31 – in the siliceous-carbonate rocks (“gorevsky” type), 32 – sulphide-polymetallic type in the siliceous-carbonaceous rocks (“rassohinsky” type); 33 – boundaries of facies, 34 – isogrades of index minerals of regional metamorphism of the andalusite-sillimanite type (1100–850 Ma): biotite (a), almandine (b), amphibole (v), staurolite (r), andalusite expected under the unmetamorphosed cover of platform (d); 35–37 – isogrades of index minerals and local occurrence of dynamometamorphism of the kyanite-sillimanite type (620–600 Ma): 35 – biotite isograde, 36 – area of almandine local development (Gorevsky ore-controlling fault), 37 – ilmenite-chloritoid, chloritoid-kyanite (a) and garnet-kyanite-staurolite blastomylonites (b) of the Tatarka shear zone; 38 – contact hornfels, skarns; 39 – regional faults (I – Tatarsky, II – Kulakovsky); 40 – other faults; 41 – thrusts; 42 – geological boundaries: established (a), expected (b); 43 – the area of distribution of the Phanerozoic formations of non-metamorphosed cover (Pogromninskaya, Kulakovskaya and Kazachinskaya basins); 44 – contour of deep geological mapping a 1 : 200 000 scale. The inset map: the position of Cisangarian metamorphic complex in the tectonic structure of the region.

Возраст усть-ангарских известняков, по данным Sr-изотопии, древнее 750 млн лет [3], что согласуется с изотопным возрастом свинцов (845–850 млн лет) Горевского стратиформного свинцово-цинкового месторождения [1]. Венчают разрез позднего рифея метаалевропелиты и метапсаммиты свиты Сухого хребта. Магматические образования в пределах ПМК представлены мелкими телами базитов мощностью до 20 м – слюдисто-гранатовыми метадолеритами (“слюдянными диабазитами” [7]), которые прорывают метапелиты сухопитской серии, и поздними долеритами Белокопытовского пояса. Базиты отнесены соответственно к ранней и поздней фазам ведугинского комплекса долеритов [9]. Возраст долеритов, вероятно, близок к 740 млн лет [8, 19]. В устье Ангары обнажен Стрелковский массив лейкогранитов глушихинского комплекса с U-Pb SHRIMP II возрастом циркона 730 млн лет [2], прорывающий “усть-ангарские” известняки горевской свиты. С учетом комплекса геохронологических данных вероятный диапазон отложения карбонатов горевской свиты около 850–750 млн лет, т.е. дометаморфический.

Первые сведения по метаморфизму района исследований отражены на “Схеме метаморфических фаций Енисейского кряжа” м-ба 1 : 1 000 000 [6]. Ю.А. Кузнецов на основании изучения разрезов р. Ангары и р. Енисея впервые выделил мурожно-татарский зеленосланцевый метаморфический комплекс (МТК) – “...самостоятельное образование, более юное, чем канский и енисейский комплексы...” [7, с. 119]. Предполагалось, что усть-ангарские неметаморфизованные известняки трансгрессивно залегают на породах МТК, а локальное присутствие ставролитсодержащих гранат-слюдяных сланцев в составе МТК (нижнее течение р. Тасеевой) связывалось с посольненскими гранитами и слюдоносными пегматитами. А.А. Якшин [24] при описании Кондаковского месторождения слюдоносных пегматитов (Слюдрудник) отмечает проявление слюдяно-силлиманитовых и кинанитовых сланцев, тяготеющих к контактам пегматоидных и кварцевых жил. По результатам глубинного геологического картирования (ГГК) [4] (см.рис. 1) к югу от Ангары в междуречье Енисей–Тасеевой–Бол. Сполошной выявлен более широкий ареал распространения зональности осадочно-метаморфических пород [16], что дает веское основание для пересмотра границы распространения, *P-T* условий и возраста метаморфизма МТК.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования базируются на результатах ГГК м-ба 1 : 200 000 в комплексе с геологическим доизучением площади м-ба 1 : 50 000, произведенных в 1985–1991 гг. Западной партией Ангарской геологоразведочной экспедиции ПГО “Красноярскгео-

логия” (комплексное изучение опорных разрезов докембрия с помощью профилей глубокого бурения, ключевых разрезов обнажений по рекам Ангаре, Енисею, Татарке, Тасеевой и др.). Особенности геологического строения допалеозойского кристаллического основания и строения ПМК отражены на рис. 1.

Оценка *P-T* условий метаморфизма пород (табл. 1) получена на основе составов породообразующих минералов и их зональности с помощью известных минеральных геотермобарометров, обзор которых приведен в [5]. Для гранатсодержащих метапелитов пиковые температуры и давления определялись с использованием двух калибровок и соответствующих моделей состав–активность для *Grt-Bt* геотермометров [29, 32, 44, 45] и *Grt-Bt-Pl-Qz* [46] и *Grt-Bt-Ms-Pl* [30] геобарометров, а также *Grt-Ms-Pl-Qz* [44] и *Grt-Bt-Ms-As-Qz* [45]. В безгранатовых парагенезисах метабазитов эти значения были получены с применением калибровки и моделей смешения [33, 43, 44] для *Amp-Pl* геотермометра [27] и *Amp-Pl-Qz* геобарометра [26]. Здесь и далее в тексте символы минералов приняты по [42]. Величины *P-T* параметров метаморфизма пород были рассчитаны при совместном использовании обозначенных геотермометров и геобарометров в пакете MATHEMATICA 5.0 с помощью процедуры NullSpace [43]. Для независимого контроля давления эти значения сопоставлялись с оценками давлений, полученных с помощью четырех калибровок для *Al-Hrb* геобарометров [25, 31, 34, 39]. Ошибки определения *P-T* параметров при совместном использовании геотермометров и геобарометров, вычисленные с учетом аналитических погрешностей и энтальпии реакций геотермобарометров, не превышают  $\pm 30^\circ\text{C}$  и  $\pm 0.5$  кбар [37], что согласуется с цитируемыми в литературе погрешностями геотермобарометров [35].

Датирование *Bt-Grt* плагиогнейса из ПМК производилось по трем зернам монацита (рис. 2) непосредственно в шлифах *in situ* **изохронным химическим** методом на основании содержания Th, U и Pb (табл. 2) [21, 22]. Количественный анализ состава монацитов выполнен на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX 100 (ИГГ УрО РАН). Условия измерения: ускоряющее напряжение 15 кВ, сила тока пучка электронов 270 нА, диаметр зонда 2–5 мкм. Стандартные образцы для градуировочных зависимостей: ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>, Pb<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, синтетические фосфаты РЗЭ, диопсид. Расчет значений возрастов проводился по единичным определениям содержаний Th, U, **Pb в каждой точке зерна** [38] и по совокупности точек с построением изохроны в координатах ThO<sub>2</sub>\*–PbO [35, 40]. Здесь Th\* = (Th + U<sup>экв</sup>), где U<sup>экв</sup> – содержание U, пересчитанное в эквивалентное содержание Th, способное создать за время жизни минерала то же количество Pb. Согласно [41], параметр  $\beta = (\text{Si} + \text{Ca})/(\text{Th} + \text{U} + \text{Pb})$ , характеризующий

**Таблица 1.** Оценки *P-T* условий метаморфизма пород ПМК по разным геотермобарометрам

**Table 1.** Summary of *P-T* estimates calculated with conventional thermobarometry for selected samples of Cisangarian metamorphic complex

№ обр.	Минеральная ассоциация	<i>T</i> , °C / <i>P</i> , кбар					<i>P</i> , кбар			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Породы р. Тасеева										
12-19	<i>Pl+Amp+Bt+Spn</i>					4.9/629	7.0	7.5	7.3	7.3
12-22	<i>Pl+Amp</i>					5.1/646	7.1	7.6	7.4	7.4
12-23	<i>Grt+Bt+Pl+Ms+St+Sil</i>	6.0/567	4.6/498	4.3/552	6.5/547					
12-25	<i>Grt+Pl+Ms+Bt+St+Sil</i>	6.4/588	4.9/504	4.6/572	6.6/579					
С 2	<i>Grt+Pl+Bt+Ms+Sil</i>	6.5/601	4.7/509	4.8/592	6.5/609					
породы р. Ангара										
347-1	<i>Grt+Pl+Ms+Bt</i>	5.0/546	4.1/540							
347-3	<i>Grt+Pl+Bt+Ms</i>	4.7/527	4.2/485							
12-29	<i>Pl+Amp+Bt</i>					5.3/578	5.9	6.2	6.3	6.3
12-30	<i>Pl+Amp+Bt+Spn</i>					5.5/588	5.6	5.9	6.0	6.0

Примечание. Используемые геотермобарометры (*T*, °C / *P*, кбар): 1 – [32]/[46], 2 – [44], 3 – [45], 4 – [29]/[30], 5 – [27]/[26]; геобарометры (*P*, кбар): 6 – [31], 7 – [34], 8 – [39], 9 – [25].

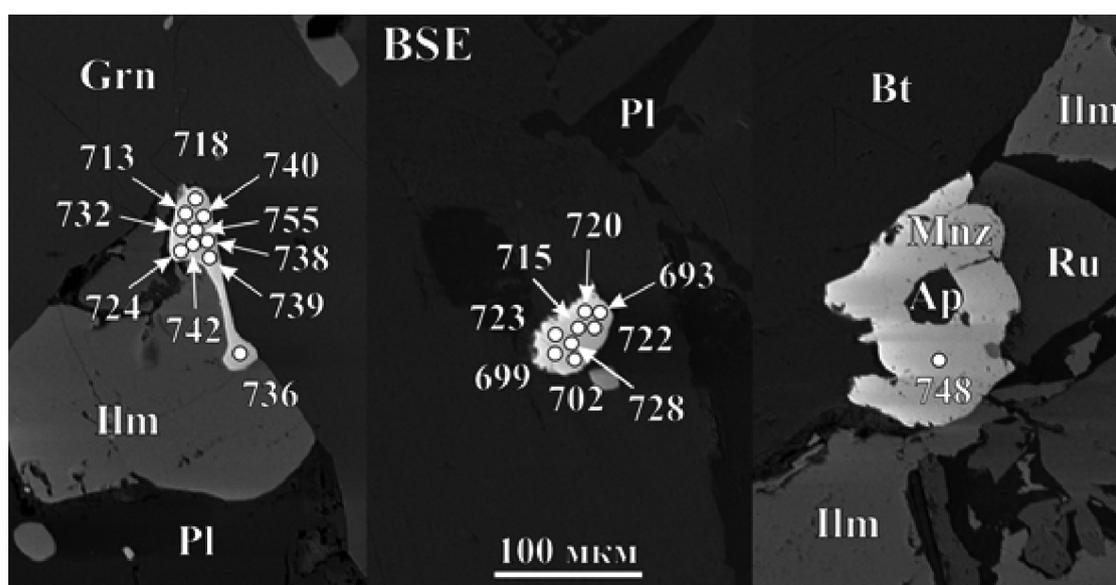
Note. Used geothermobarometries (*T*, °C/*P*, kbar): see above.

степень зарядовой компенсации примесей Th<sup>4+</sup>(U<sup>4+</sup>), рассматривается как показатель замкнутости Th-U-Pb системы минерала: при его близости к 1 система считается замкнутой. Для наших зерен монацита параметр β = 0.96–1.04 свидетельствует о замкнутости системы и корректности оценки возраста. Ранее была показана хорошая сходимость результатов датирования *in situ* Th-U-Pb методом по монациту с изотопными данными (U-Pb SHRIMP-II по цирконам, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar по слодам и амфиболам) [18, 28].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате петрологических и геохронологических исследований в развитии выделенного ПМК отчетливо установлено проявление двух типов метаморфизма: раннего – андалузит-силлиманитового – и позднего – кианит-силлиманитового типов.

Андалузит-силлиманитовый тип представлен региональными зонами “хлорита”, “биотита”, “граната”, “ставролита”, “андалузита” и “силлиманита”.



**Рис. 2.** Изображение зерен монацита в обратнорассеянных электронах с указанием точек анализа и возраста.

**Fig. 2.** Back scattered electron images of monazites grains with location of analytical spots (circles) and the calculated ages.

**Таблица 2.** Состав (мас. %) и возраст (млн лет) монацита из плагиогнейса ПМК

**Table 2.** Representative mineral analyses (wt%) and U-Th-Pb ages (Ma) for monazite from biotite-garnet plagiogneiss of Cisangarian metamorphic complex.

Компонент	1	3	6	9	10	12	13	14	16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	30.08	29.67	29.70	29.71	29.39	30.17	30.25	29.91	30.04
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.21	26.63	26.96	26.21	27.26	26.96	26.73	27.98	27.91
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.32	10.91	11.10	11.28	11.31	12.31	11.55	11.74	11.33
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.45	13.66	14.10	13.84	14.24	13.90	14.06	14.52	15.11
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.27	3.17	3.25	3.30	3.27	3.30	3.31	3.40	3.39
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.96	3.11	3.05	2.88	2.98	2.57	2.62	3.00	3.35
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.03	2.08	2.27	2.13	2.06	1.70	1.66	2.11	2.16
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.28	0.19	0.33	0.27	0.12	0.15	0.25	0.17
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.49	0.57	0.43	0.68	0.53	0.86	0.61	0.50	0.47
CaO	1.23	1.12	1.18	1.30	1.06	1.12	1.19	0.84	0.80
SiO <sub>2</sub>	0.30	0.32	0.32	0.31	0.26	0.40	0.33	0.32	0.31
ThO <sub>2</sub>	6.06	6.10	5.23	5.73	4.94	5.15	5.14	4.00	3.83
UO <sub>2</sub>	0.79	0.89	0.72	0.98	0.77	0.69	0.71	0.68	0.45
PbO	0.27	0.28	0.24	0.28	0.24	0.23	0.23	0.20	0.16
Сумма	98.68	98.80	98.75	98.95	98.57	99.48	98.52	99.46	99.50
Возраст, млн лет	718	732	724	739	736	720	715	728	723

Примечание. Приведены составы 9 представительных анализов (из 18), погрешность определений возраста в каждой из точек около ±30 млн лет.

Note. The 9 of 18 representative analyses have been shown; age error of EMPA does not exceed 30 Ma for each measure.

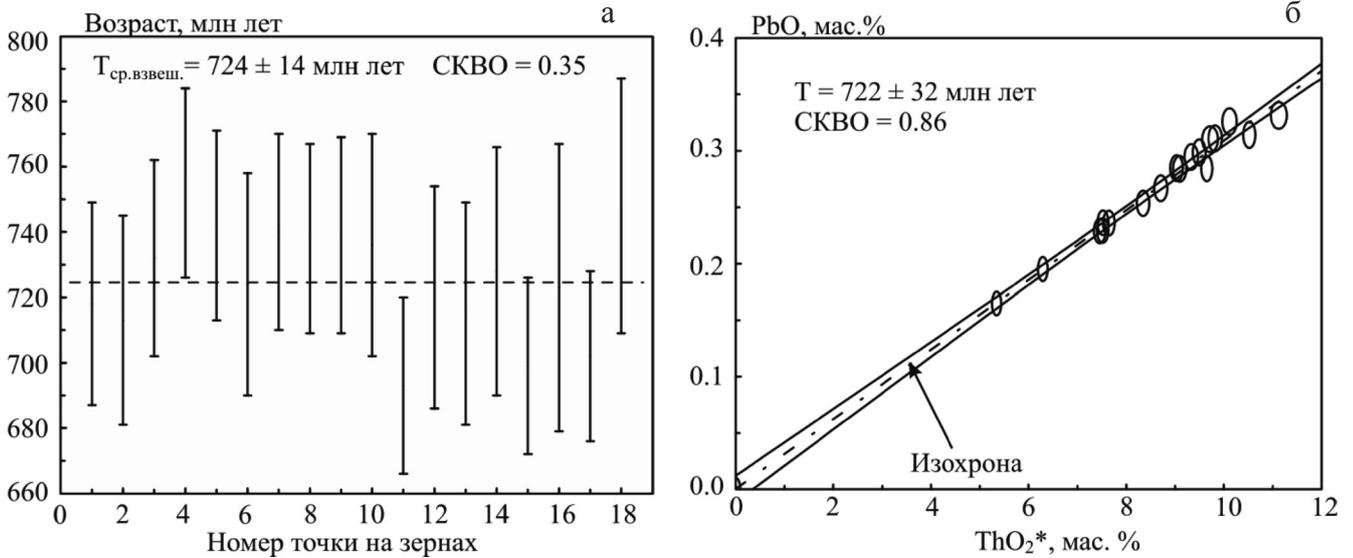
та”. Кианит-силлиманитовый тип проявлен локально зонами “хлоритоида” и “дистена” на юго-западном продолжении Ишимбинско-Татарской региональной сдвиговой зоны (см. рис. 1). Важная особенность проявления последнего – наложение локального метаморфизма на терригенно-осадочные отложения свиты Сухого хребта кровли неопротерозойских толщ. Об этом свидетельствуют вычисленные *P-T* тренды эволюции метапелитов с постепенным повышением давления при приближении к надвигу от 4.1 до 5.6 кбар при незначительном повышении температуры от 530 до 560°C, что указывает на почти изотермическое погружение пород при низком метаморфическом градиенте с *dT/dH* не более 10°C/км [10].

Результаты геотермобарометрии показали видимые различия по *P-T* параметрам формирования толщ разного химического состава (4.9–5.5 кбар/580–650°C – метабазиты; 4.1–6.6 кбар/500–610°C – метапелиты) в пределах погрешностей методов (см. табл. 1), что свидетельствует о неоднородности метаморфических комплексов ПМК. В целом же метаморфизм этих пород отвечал условиям эпидот-амфиболитовой фации и диапазону ее перехода к амфиболитовой фации.

В последовательности тектонических событий изученные проявления метаморфизма могут отражать различные этапы в докембрийской эволюции Енисейского кряжа. Ранние датировки рассматриваются как свидетельство проявления грениль-

ских событий в западном обрамлении Сибирского кратона [5, 12–15, 18]. Они синхронны с U-Th-Pb и Rb-Sr оценками возраста тейского гранитогнейсового купола (1100–950 млн лет) [11], сопряженного с ареалами регионально-метаморфических пород низких давлений андалузит-силлиманитового типа в заангарской части Енисейского кряжа (1056 ± 28 млн лет) [18], с возрастными данными метабазитов метапикробазальт-базальтовой ассоциации Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса (1043 ± 12 млн лет) [23] и высокобарических бластомилонитов в пределах Южно-Енисейского кряжа (1107 ± 25 млн лет) [17]. По спектрам биотитов из двуслюдяных кристаллических сланцев с гранатом Кулаковского поднятия получены четкие плато с возрастными величинами длительности подъема пород возраст метаморфизма в Кулаковском поднятии должен быть не древнее 864 млн лет [12]. Среди других возрастных данных по ПМК известны K-Ar датировки по биотиту из двуслюдяных кристаллических сланцев скважины 183 (805 ± 14 млн лет), по позднему мусковиту (608 ± 10 млн лет), по биотиту из слюдяных кристаллических известняков горевской свиты (скв. 165) (622 ± 10 млн лет) [4].

В результате химического датирования монацита из гранат-биотитового плагиогнейса ПМК получены новые значения возраста позднего этапа метаморфизма. Для анализа использовались достаточно однородные зерна метаморфогенного монацита, яв-



**Рис. 3.** Вариации значений Th-U-Pb-возрастов и их средневзвешенная величина для 18 точечных определений (а) и изохрона по ThO<sub>2</sub>\*/PbO данным (б) для монацита из биотит-гранатового плаггиогнейса. Эллипсы – значения погрешности 2σ.

**Fig. 3.** Th-U-Pb weighted mean ages for 18 single data points (a) and isochrone for population of data on of PbO/ThO<sub>2</sub>\* (б) in monazite from biotite-garnet plagiogneiss. Ellipse is the 2σ error values.

ляющегося цериевой разностью с высоким содержанием тория, с присутствием примесей CaO до 1.65 мас. %, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 0.92 мас. % и SiO<sub>2</sub> до 0.40 мас. % (табл. 2). Содержание оксидов радиоактивных компонентов достаточно сильно варьирует: ThO<sub>2</sub> – 3.83–7.87, UO<sub>2</sub> – 0.45–1.67, PbO – 0.16–0.33 мас. %. Из точечных определений содержания U, Th, Pb нами выполнен расчет возрастов монацита в интервале 693–755 млн лет (рис. 3а). Их статистическая обработка с построением гистограмм распределения свидетельствует о возрастной гомогенности минерала со средневзвешенным возрастом  $724 \pm 14$  млн лет ( $SKBO = 0.35$ ). Благодаря широкому интервалу значений содержания тория и свинца в зернах монацита построена изохрона и определен возраст  $722 \pm 32$  млн лет по углу ее наклона (рис. 3б). Содержание нерадиоогенного свинца, рассчитанное по пересечению изохроны с осью PbO, составляет менее 0.001 мас. %, что намного меньше его предела обнаружения в минерале. Полученные новые геохронологические данные свидетельствуют о проявлении метаморфического события около 730 млн лет назад в пределах Ишимбинско-Татарской региональной сдвиговой зоны рифтогенной природы, с которой тесно связано формирование Татарского тантал-ниобиевого месторождения.

### ВЫВОДЫ

По результатам геолого-структурных, минералого-петрологических и изотопно-геохроноло-

гических исследований “белого пятна” на стыке ангарских и ангаро-канских структур выделены два этапа в развитии метаморфизма ПМК, различающиеся термодинамическими режимами и возрастом. К первому этапу относятся проявления зонального прогрессивного метаморфизма низких давлений андалузит-силлиманитового типа возрастом около 1100–850 млн лет. На позднем этапе (730–600 млн лет) в локальных участках, приуроченных к южному продолжению Ишимбинско-Татарской системы разломов, эти породы подверглись кианит-силлиманитовому метаморфизму умеренных давлений. Ранний этап эволюции региона связывается с гренвильской тектоникой, поздний – с аккреционно-колизийными процессами формирования предванд-вендских региональных сдвиговых зон и завершением неопротерозойской эволюции орогена в юго-западном обрамлении Сибирского кратона [20].

*Исследования осуществлялись при финансовой поддержке грантов президиума СО РАН (партнерский проект фундаментальных исследований № 12 между СО РАН, УрО РАН и ДВО РАН) и РФФИ (14-05-00117).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимцев В.А.* Минералого-геохимические особенности и условия формирования стратиформных полиметаллических руд Ангарского рудного района

- (Енисейский кряж) Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук в форме научного доклада. Новосибирск: 1992. 42 с.
2. *Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач А.Б., Травин А.В., Палеский С.В., Яковлева С.З., Ясенов А.М., Федосеев А.М.* Неопротерозойские постколлизийные гранитоиды глушихинского комплекса, Енисейский кряж *Петрология*. 2003. Т. 11, № 1. С. 53–67.
  3. *Вшинева И.А., Кочнев Б.Б., Летникова Е.Ф., Кузнецов А.Б., Прошенкин А.И.* Sr-изотопные характеристики карбонатных отложений неопротерозоя юга Енисейского кряжа // Докл. АН. 2012. Т. 443, № 4. С. 459–463.
  4. *Козлов П.С.* Петрология и петрохимия метепелитов Заангарья Енисейского кряжа: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1994. 20 с.
  5. *Козлов П.С., Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Зиновьев С.В.* Тектоно-метаморфическая эволюция гаревского полиметаморфического комплекса // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 11. С. 1476–1496.
  6. *Корнев Т.Я.* Схема метаморфических фаций Енисейского кряжа // Докембрийские кристаллические комплексы Енисейского кряжа. Путеводитель Енисейской экскурсии Всесоюз. Петрограф. совещ. Новосибирск: ИГиГСОАН СССР, 1984, 117 с.
  7. *Кузнецов Ю.А.* Петрология докембрия Южно-Енисейского кряжа. Т. 1. Новосибирск: Наука, 1988. с
  8. *Лавренчук А.В., Метелкин Д.В., Белоносов И.В.* Новые петролого-геохимические и палеомагнитные данные по неопротерозойским дайковым комплексам Саяно-Енисейской окраины Сибирской платформы // Петрология магматических и метаморфических комплексов: мат-лы науч. конф. / Вестник Томского университета. Приложение. 2005. С. 100–105.
  9. Легенда Енисейской серии Государственной геологической карты Российской Федерации м-ба 1 : 200 000 (2-е изд.) / Ред. Л.К. Качевский. Красноярск, 1998. 197 с.
  10. *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 // Докл. АН. 2006. Т. 411, № 2. С. 235–239.
  11. *Лиханов И.И., Ревердатто В.В.* P-T-t эволюция метаморфизма в Заангарье Енисейского кряжа: петрологические и геодинамические следствия // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 3. С. 385–416.
  12. *Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С.* Коллизионные метаморфические комплексы Енисейского кряжа: особенности эволюции, возрастные рубежи и скорость эксгумации // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 10. С. 1593–1611.
  13. *Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С.* U-Pb и <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar свидетельства гренвилльских событий на Енисейском кряже при формировании тейского полиметаморфического комплекса // Геохимия. 2012. Т. 50, № 6. С. 607–614.
  14. *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 // Докл. АН. 2011. Т. 436, № 4. С. 509–514.
  15. *Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Зиновьев С.В.* Новые доказательства гренвилльских событий на западной окраине Сибирского кратона на примере гаревского метаморфического комплекса в Заангарье Енисейского кряжа // Докл. АН. 2011. Т. 438, № 4. С. 522–527.
  16. *Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Попов Н.В.* Коллизионный метаморфизм докембрийских комплексов в Заангарье Енисейского кряжа // Петрология. 2008. Т. 16, № 2. С. 148–173.
  17. *Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Хиллер В.В.* Первые данные о проявлении мезопротерозойских тектонических событий в геологической истории Южно-Енисейского кряжа // Докл. АН. 2013. Т. 453, № 6. С. 671–675.
  18. *Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Хиллер В.В., Сухоруков В.П.* Зональность граната в метапелитах как следствие трех метаморфических событий в докембрийской истории Енисейского кряжа // Петрология. 2013. Т. 21, № 6. С. 612–631.
  19. *Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю.* Неопротерозойский этап эволюции Родинии в свете новых данных по западной окраине Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 1. С. 42–59.
  20. *Ножкин А.Д., Туркина О.М., Советов Ю.К., Травин А.В.* Вендское аккреционно-коллизийное событие на юго-западной окраине Сибирского кратона // Докл. АН. 2007. Т. 415, № 6. С. 782–787.
  21. *Хиллер В.В.* Состав, кристаллохимия, эволюция U-Th-Pb системы ряда минералов-геохронометров по данным экспериментального исследования и компьютерного моделирования: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. 23 с.
  22. *Хиллер В.В., Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Иванов К.С.* Химическое микронзондовое Th-U-Pb-датирование гранитных пегматитов Липовского рудного поля (Урал) // Докл. АН, 2014. Т. 455, № 2. С. 216–219.
  23. *Черных А.И.* Геологическое строение и петролого-геохимические особенности докембрийских офиолитовых и палеоостроводужных комплексов Енисейского кряжа: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 2000. 20 с.
  24. *Якжин А.А.* Обзор пегматитов Кондаковского месторождения Восточной Сибири // Слюды СССР. Л.; М.: Главная редакция геолого-разведочной и геодезической литературы, 1937. С. 258–280.
  25. *Anderson L.J., Smith R.D.* The effects of temperature and fO<sub>2</sub> on the Al-in-hornblende barometer // Amer. Mineral. 1995. V. 80. P. 549–559.
  26. *Bhadra S., Bhattacharya A.* The barometer tremolite + tschermakite + 2 albite = 2 pargasite + 8 quartz: constraints from experimental data at unit silica activity, with application to garnet-free natural assemblages // Amer. Mineral. 2007. V. 92. P. 491–502.
  27. *Blundy J.D., Holland T.J.B.* Calcic amphibole equilibria and new amphibole-plagioclase geothermometer // Contrib. Mineral. Petrol. 1990. V. 104. P. 208–224.
  28. *Cocherie A., Albaredo F.* An improved U-Th-Pb age calculation for electron microprobe dating of monazite // Geochim. Cosmochim. Acta. 2001. V. 65, № 24. P. 4509–4522.
  29. *Ferry J.M., Spear F.S.* Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet // Contrib. Mineral. Petrol. 1978. V. 66. P. 113–117.

30. Ghent E.D., Stout M.Z. Geobarometry and geothermometry of plagioclase-biotite-garnet-muscovite assemblages // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1981. V. 76. P. 92–97.
31. Hammarstrom J.M., Zen E.-A. Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer // *Amer. Mineral.* 1986. V. 71. P. 1297–1313.
32. Holdaway M.J. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer // *Amer. Mineral.* 2000. V. 85. P. 881–892.
33. Holland T.J.B., Blundy J.D. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1994. V. 116. P. 433–447.
34. Hollister L.S., Grissom G.C., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons // *Amer. Mineral.* 1987. V. 72. P. 231–239.
35. Ivanov K.S., Erokhin Y.V., Khiller V.V., Ponomarev V.S., Fedorov Y.N. Isotopic and chemical U-Pb dating of granitoids from the Western Siberian megabasin // *Doklady Earth Sciences*, 2010. V. 433, № 2. P. 1070–1073.
36. Kohn M.J., Spear F.S. Error propagation for barometers // *Amer. Mineral.* 1991. V. 76. P. 138–147.
37. Likhanov I.I. Chloritoid, staurolite and gedrite of the high-alumina hornfels of the Karatash pluton // *Int. Geol. Rev.* 1988. V. 30. P. 868–877.
38. Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A. Electron microprobe dating of monazite // *Chem. Geol.* 1996. V. 131. P. 37–53.
39. Schmidt M.W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1992. V. 110. P. 304–310.
40. Suzuki K., Adachi M., Tanaka T. Middle Precambrian provenance of Jurassic sandstone in the Mino Terrane, central Japan: Th-U-total Pb evidence from an electron microprobe monazite study // *Sediment. Geol.* 1991. V. 75. P. 141–147.
41. Suzuki K., Kato T. CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data // *Gondwana Res.* 2008. V. 14. P. 5.
42. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *Amer. Mineral.* 2010. V. 95. P. 185–187.
43. Wolfram S. *The Mathematica Book*, 5<sup>th</sup> Champaign IL: Wolfram Media Inc., 2003. 544 p.
44. Wu C.M., Zhao G.C. Recalibration of the garnet-muscovite (GM) geothermometer and the garnet-muscovite-plagioclase-quartz (GMPQ) geobarometer for metapelitic assemblages // *J. Petrol.* 2006. V. 47. P. 2357–2368.
45. Wu C.M., Zhao G.C. The metapelitic garnet-biotite-muscovite-aluminosilicate-quartz (GBMAQ) geobarometer // *Lithos.* 2007. V. 97. P. 365–372.
46. Wu C.M., Zhang J., Ren L.D. Empirical garnet-biotite-plagioclase-quartz (GBPQ) geobarometry in medium- to high-grade metapelites // *J. Petrol.* 2004. V. 45. P. 1907–1921.

*Рецензент А.И. Русин*

## **Cisangarian metamorphic complex (Yenisey Ridge): Geological features, *P-T* conditions, and age of metamorphism**

**P. S. Kozlov\*, I. I. Likhanov\*\*, S. V. Zinov'ev\*\*\*, V. V. Khiller\***

*\*Institute of Geology and Geochemistry Urals Branch of RAS*

*\*\*Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch of RAS*

*\*\*\*Novosibirsk State University*

Studies of metamorphic rocks in the zone of junction of the North and South Yenisey Ridge region are considered. Interpretation of new petrological and geochronological data allowed us to allocate the Cisangarian metamorphic complex and to constrain two major stages in its development. The first stage occurred as a result of the Grenville-age orogeny during late Meso – early Neoproterozoic (1100–850 Ma) and was marked by low-pressure andalusite-sillimanite type zoned metamorphism on sedimentary and volcanic sequences of Sukhoy Pit Group. At the second stage, in the vicinity of the thrust faults of the Tatarka-Ishimba suture zone, these rocks were experienced middle-late Neoproterozoic (730–600 Ma) collision-related medium-pressure metamorphism of kyanite-sillimanite type. These metamorphic episodes of regional crust evolution are correlated with the synchronous succession and similar style of the tectono-thermal events within the Teya complex in the Transangarian part of the Yenisey Ridge. Crustal thickening and related compressional deformation and metamorphism are assumed to have been attributed to the accretion-collision events on the western margin of Siberian Craton.

*Key words: deep geological mapping, metamorphism, geothermobarometry, geochronology, Cisangarian metamorphic complex, Yenisey Ridge.*