

УДК 551.251

ПЕРЕСМОТР ПАРАДИГМЫ «ТРОЙНОЙ ТОЧКИ» Al_2SiO_5

И. И. Лиханов

Институт геологии и минералогии СО РАН им. В. С. Соболева (пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090)

Минералы группы силлиманита (андалузит, силлиманит, кианит), широко развитые в Заангарской части Енисейского кряжа, представляют особый интерес для производства глинозема, силумина и алюминия. С другой стороны, «тройная точка», соответствующая равновесному сосуществованию всех полиморфов Al_2SiO_5 , – один из наиболее важных инвариантных узлов в метаморфической петрологии. Минеральные ассоциации с участием полиморфов «тройной точки» информативны для калибровки геотермобарометров, выявления индикаторных изотопных характеристик и ряда других геохимических параметров. На примере ряда метаморфических комплексов высокоглиноземистых метапелитов, характеризующихся присутствием трех полиморфов Al_2SiO_5 , приведены геолого-структурные, минералого-петрологические и изотопно-геохронологические свидетельства их полиметаморфической истории. В изученных ореолах наложение более поздних минеральных ассоциаций на ранние в ходе разных геодинамических событий четко фиксируется по реакционным структурам и химической зональности минералов, конфигурации *PT*-трендов и изотопным датировкам. Эти индикаторные признаки свидетельствуют о последовательном росте полиморфов Al_2SiO_5 в результате сложной полиметаморфической истории, обусловленной сменой разных тектонических обстановок. Сравнительный анализ полученных результатов с опубликованными данными по другим регионам мира показал, что во всех изученных случаях минералы Al_2SiO_5 находились в реакционных соотношениях и образовались в разное время, хотя *PT*-тренды полиморфов могли проходить вблизи или непосредственно через «тройную точку». Это позволяет сделать вывод, что минеральная ассоциация «тройной точки» Al_2SiO_5 , в которой все три полиморфа находятся в стабильном равновесии, неустойчива в метапелитах любого химического состава. Следовательно, принятое в петрологии использование таких ассоциаций для оценки *PT*-параметров метаморфизма и калибровки геотермобарометров не является корректным.

Ключевые слова: полиморфы Al_2SiO_5 ; высокоглиноземистые метапелиты; «тройная точка»; полиметаморфизм; Енисейский кряж

Для цитирования: Лиханов И. И. Пересмотр парадигмы «тройной точки» Al_2SiO_5 // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 80–84. doi: 10.17076/geo2168

Финансирование. Работа выполнена за счет средств гранта РНФ (проект № 21-77-20018-П).

I. I. Likhanov. THE “TRIPLE POINT” PARADIGM OF ALUMINOSILICATES REVISITED

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia)

The Al_2SiO_5 polymorphs (andalusite, kyanite, and sillimanite), which are widespread in aluminous metamorphic rocks, are gaining importance as industrial sources for producing aluminum oxide, silumin, and aluminum. On the other hand, the “triple point”, which corresponds to the equilibrium coexistence of all three Al_2SiO_5 polymorphs, is one of the key invariant points in metamorphic petrology. Mineral assemblages with triple-point polymorphs provide reference information for the calibration of geothermobarometers and for identification of isotope indicator features and some other geochemical parameters. The polymetamorphic history of a series of metamorphic complexes of Al-rich metapelites in the Yenisei Range, with rocks containing an Al silicate triple-point assemblage (all three Al_2SiO_5 polymorphs), is illustrated by structural-geological, mineralogical-petrological, and isotope geochronological evidence. In the studied aureoles, overprinting of later mineral assemblages onto earlier ones during various geodynamic events obviously follows from the reaction microtextures and chemical zoning in minerals, the *PT* trajectories of these rocks, as well as radiometric dating. These indicator features show that the Al_2SiO_5 polymorphs grew sequentially as a result of a complex polymetamorphic history due to changes in the tectonic environments. A comparative analysis of the new results and the literature on other metamorphic regions worldwide shows that the Al_2SiO_5 minerals always (at least in the studied rocks) occur in reaction relationships with one another, grew at different time periods during the metamorphic history of the rocks, and hence, cannot be regarded as true triple-point assemblages, although some segments of the looping *PT* paths may pass near the triple point. We conclude that the aluminum silicate triple-point assemblages, in which all three Al_2SiO_5 minerals are in stable equilibrium, are not possible in metapelitic rocks of any chemical composition. Hence, such purported triple-point assemblages cannot represent a stable association and cannot be used to calibrate or test geothermobarometers.

Keywords: Al_2SiO_5 minerals; Al-rich metapelites; triple point; polymetamorphism; Yenisei Range

For citation: Likhanov I. I. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 80–84. doi: 10.17076/geo2168

Funding. The study was funded by a Russian Science Foundation grant (project #21-77-20018-П).

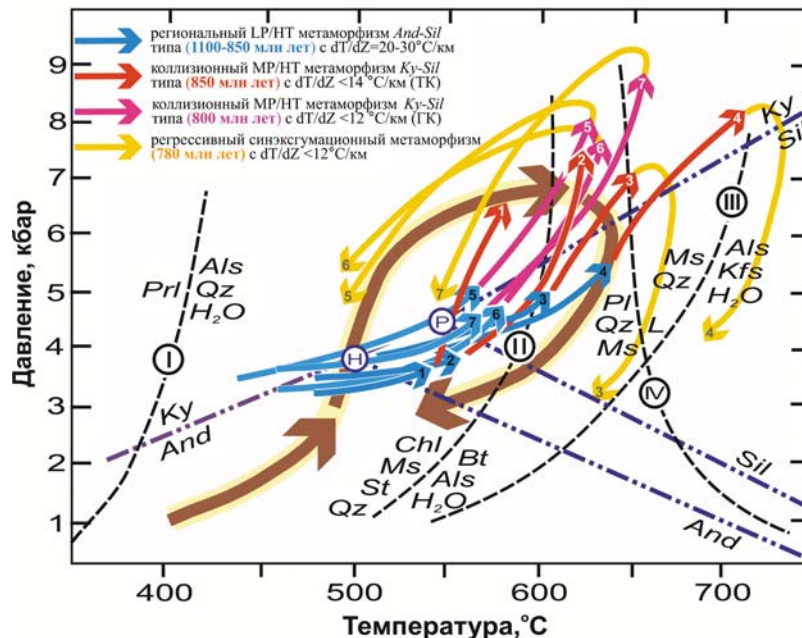
Полиморфные модификации Al_2SiO_5 – кианит, андалузит и силлиманит – важнейшие индикаторы метаморфизма в горных породах. Андалузит устойчив при низких давлениях и температурах; при росте давления он сменяется кианитом, а при повышении температуры они оба замещаются силлиманитом, что приводит к формированию зональных метаморфических комплексов или фациальных серий низких и умеренных давлений. «Тройная точка», соответствующая устойчивому равновесному сосуществованию всех трех полиморфов Al_2SiO_5 , – один из наиболее важных инвариантных узлов в метаморфической петрологии. Минеральные ассоциации с участием этих фаз информативны для калибровки геотермобарометров, выявления индикаторных изотопных характеристик и ряда других геохимических параметров [Reverdatto et al., 2019].

В литературе описано несколько проявлений метаморфизма с «тройной точкой», к наиболее известным из которых относятся Белз Бьюитт в Айдахо, Маунт Мусилок в Нью-Гэмпшире и поднятия Рио Мора, Пикурис, Тручас в Нью-Мексико [Likhanov, Santosh, 2020]. Они считались характерными примерами зональных ореолов одноактного метаморфизма, формировавшихся при *PT*-параметрах «тройной точки». Это так называемый «тип Айдахо» [Hietanen, 1967]. Пересмотр этих объектов с применением новейших методов исследований показал, что во всех случаях минералы Al_2SiO_5 образовались в разное время и не могут считаться стабильными одновременно в метапелитах обычного химического состава [Pattison, 2001]. Теоретически благоприятная ситуация для одновременного появления андалузита, силлиманита и кианита возможна только в более редких

в природе высокоглиноземистых составах пород. Нам это представляется недостаточно обоснованным, поскольку речь здесь может идти не об одновременном устойчивом сосуществовании указанных минералов, а об их последовательной смене в процессе эволюции термодинамических условий при полиметаморфизме. Статья посвящена обоснованию этих положений на примере высокоглиноземистых метapelитов Енисейского кряжа, для которых типична ассоциация трех полиморфов Al_2SiO_5 .

По химическому составу эти породы классифицируются как низкокальциевые и умеренно насыщенные K_2O метapelиты, одновременно обогащенные железом (Fe_2O_3 до 12 мас. %) и глиноземом (Al_2O_3 до 28 мас. %) [Лиханов и др., 2011]. Полицикличность этих комплексов, выраженная наложением поздних ассоциаций на ранние в ходе разных геодинамических событий, четко диагностируется по реакционным микроструктурам, химической зональности минералов, конфигурации PT -трендов и изотопным датировкам [Лиханов и др., 2021; Likhanov, 2022]. По результатам исследований выделены два проградных этапа в их развитии (рис.). На первом этапе сформировались высокоградиентные зональные комплексы низких давлений

And-Sil-типа с гренвилевским возрастом (~1050–950 млн лет) при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте $dT/dH = 25\text{--}35\text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$ [Likhanov, 2019]. На втором этапе вблизи надвигов эти породы подверглись неопротерозойскому (с двумя пиками – 850 и 800 млн лет) коллизионному метаморфизму умеренных давлений Ку-Sil-типа, в результате чего происходило прогрессивное замещение $\text{And} \rightarrow \text{Ky} \pm \text{Sil}$ [Likhanov et al., 2015]. В последовательности пород Ку-Sil-метаморфизма максимальные значения PT -параметров свойственны метapelитам чапского участка ($P = 5,8\text{--}8,4$ кбар, $T = 630\text{--}710\text{ }^\circ\text{C}$; $dT/dH = 12\text{--}14\text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$), характеризующимся повсеместным присутствием силлиманита практически во всех метаморфических зонах. Фибролит обычно появляется только вблизи гранитов (маяконский и тейский участки), что связывается с локальным привнесом дополнительного тепла со стороны гранитоидных интрузивов [Likhanov et al., 2004]. Микроструктурные взаимоотношения между полиморфами Al_2SiO_5 свидетельствуют о последовательном росте андалузита, силлиманита, фибролита и кианита при метаморфизме с преобладанием различных схем реакционных замещений между этими минералами [Likhanov, Santosh, 2020].



PT -тренды эволюции метаморфизма для метapelитов тейского (1–4) и гаревского (5–7) комплексов Енисейского кряжа в сравнении с обобщенной PT -эволюцией And+Ky+Sil-содержащих пород из других регионов мира (бурая петля)

PT - t diagrams showing the generalized PT path calculations for metapelites in the Teya (1–4) and Garevka (5–7) complexes of the Yenisei Ridge in comparison with the PT evolution of rocks containing the And+Ky+Sil assemblages in other metamorphic complexes worldwide (brown loop)

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, *PT*-условиях формирования, величинах метаморфических градиентов и изотопных датировках разных типов метаморфизма свидетельствуют о последовательном росте полиморфов Al_2SiO_5 , связанном со сложной полиметаморфической историей при смене тектонических условий. Во всех случаях минералы Al_2SiO_5 образовались в разное время и не могут считаться стабильными одновременно, хотя *PT*-тренды полиморфов могли проходить вблизи «тройной точки» или непосредственно через нее (рис.). Сравнительный анализ с аналогичными проявлениями в других регионах мира показал, что в природе не существует истинных парагенезисов «тройной точки», в которых три разных полиморфа Al_2SiO_5 росли бы одновременно при одинаковых *PT*-условиях и при этом были бы уравновешены в отношении всех компонентов. Они всегда находились в реакционных соотношениях, то есть формировались разновременно. Это означает, что использование таких ассоциаций для оценки *PT*-параметров метаморфизма и калибровки геотермометров может являться причиной значительных ошибок.

Соотношения устойчивости природных полиморфов Al_2SiO_5 алюмосиликатов нуждаются в дальнейшем изучении. И даже в том случае, когда взаимоотношения в рассматриваемой системе будут выявлены достаточно полно, при приложении экспериментальных данных к природным объектам следует прежде всего учитывать влияние компонентов-примесей, кинетику протекания реакции и образования центров кристаллизации, а не термодинамику полиморфных превращений.

Литература

- Лиханов И. И., Ревердатто В. В., Козлов П. С., Вершинин А. Е. Тейский полиметаморфический комплекс в Заангарье Енисейского края – пример совмещенной зональности фациальных серий низких и умеренных давлений // ДАН. 2011. Т. 436, № 4. С. 509–514.
- Лиханов И. И., Зиновьев С. В., Козлов П. С. Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского края (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. 2021. № 1. С. 412–465. doi: 10.31857/S0016853X21010070
- Hietanen A. On the facies series in various types of metamorphism // J. Geol. 1967. Vol. 75. P. 187–214. doi: 10.1086/627246
- Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia // Geological Society of London, Special Publications. 2019. Vol. 478. P. 89–115. doi: 10.1144/SP478.11
- Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence // Geosciences (Switzerland). 2022. Vol. 12, no. 11. Art. 402. doi: 10.3390/geosciences12110402
- Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited // Geol. J. 2020. Vol. 55, no. 6. P. 4772–4789. doi: 10.1002/gj.3716
- 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 // J. Metamorphic Geol. 2004. Vol. 22. P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x
- Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiller V. V., Sukhorukov V. P. P-T-t constraints on poly-metamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions // J. Asian Earth Sci. 2015. Vol. 113. P. 391–410. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.026
- Pattison D. R. M. Instability of Al_2SiO_5 “triple point” assemblages in muscovite+biotite+quartz-bearing metapelites, with implications // Am. Mineral. 2001. Vol. 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. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2
- Hietanen A. On the facies series in various types of metamorphism. J. Geol. 1967;75:187–214. doi: 10.1086/627246
- 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. 2011;436(2):213–218. doi: 10.1134/S1028334X11020048
- 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; 55(1):36–57. doi: 10.1134/S0016852121010076
- Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. Geological Society of London, Special Publications. 2019;478:89–115. doi: 10.1144/SP478.11
- Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence. Geosciences (Switzerland). 2022;12(11):402. doi: 10.3390/geosciences12110402
- Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited. Geol. J. 2020;55(6):4772–4789. doi: 10.1002/gj.3716

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. *J. Metamorph. Geol.* 2004;22(8):743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiler V. V., Sukhorukov V. P. P-T-t constraints on polymetamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental

reconstructions. *J. Asian Earth Sci.* 2015;113:391–410. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.026

Pattison D. R. M. Instability of Al_2SiO_5 “triple point” assemblages in muscovite + biotite + quartz-bearing metapelites, with implications. *Am. Mineral.* 2001;86:1414–1422.

Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer Geology. 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2

Поступила в редакцию / received: 29.07.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Лиханов Игорь Иванович

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: likh@igm.nsc.ru

CONTRIBUTOR:

Likhanov, Igor

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher