

К вопросу о возможности обнаружения кристаллов алмаза в глубинных ксенолитах трубки взрыва «Эклогитовая» (Восточный Памир)

Корсаков А. В.¹, Подугольникова Е. Е.¹, Демин С. П.¹, Михайленко Д. С.¹,
Гудимова А. И.¹, Агашева Е. В.¹, Одинаев Ш. А.^{2,3}, Гадоев М. Л.²

¹ Институт геологии и минералогии им В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, korsakov@igm.nsc.ru

² Институт геохимии Гуанчжоу Китайской академии наук, Гуанчжоу, Китай

³ Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикистана, Душанбе

Аннотация. Проведено комплексное исследование ксенолитов глубинных пород из трубки «Эклогитовая» (Восточный Памир), направленное на поиск метаморфогенных кристаллов алмаза в них. В ксенолитах гранулитов диагностированы включения графита в порфириобластах граната и кианита, сосуществующие с расплавленными включениями. Вблизи пика метаморфизма (950–1000 °С и < 3 ГПа) в этих породах присутствовали графит, флюид/расплав, необходимые для образования алмаза, но РТ параметры не соответствовали полю стабильности алмаза. Находки кристаллов алмаза (размером менее 2 мкм) в дефектах полировки пластинок связаны с контаминацией образцов в процессе пробоподготовки. Достоверных находок метаморфогенных кристаллов алмаза не установлено. Наиболее глубинные образцы ксенолитов эклогитов не содержат даже графита. Подобная картина наблюдается, например, в Кокчетавском массиве, в пределах которого эклогиты являются неалмазоносными, но являются изофациальными алмазоносным породам.

Ключевые слова: алмаз, графит, ксенолиты, гранулиты, эклогиты, Памир.

The possibility of finding diamond crystals in deep xenoliths from the «Eklogitovaya» pipe (Eastern Pamir)

Korsakov A. V.¹, Podugolnikova E. E.¹, Demin S. P.¹, Mikhailenko D. S.¹, Gudimova A. I.¹,
Agasheva E. V.¹, Odinaev S. A.^{2,3}, Gadoev M. L.²

¹ V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, korsakov@igm.nsc.ru

² Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China

³ Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe

Abstract. Comprehensive study of deep-seated xenoliths from the «Eklogitovaya» pipe (Eastern Pamir) was carried out to search for metamorphic diamonds in these rocks. Graphite inclusions coexisting with melt inclusions were identified in granulite xenoliths. Near the peak of metamorphism (950–1000 °C and < 3 GPa), these rocks contained graphite and fluid/melt phases necessary for diamond formation, but the P-T conditions did not correspond to the diamond stability field. Microscopic diamond crystals (< 2 μm) found in polishing defects of thin sections are attributed to sample contamination during preparation. No reliable evidence of metamorphogenic diamond crystals was confirmed. The deepest eclogite xenolith samples lack even graphite. A similar pattern is observed, for example, in the Kokchetav Massif, where eclogites are non-diamondiferous but isofacial with diamond-bearing rocks. 100–250 words.

Keywords: diamond, graphite, xenoliths, granulites, eclogites, Pamir.

Введение

Долгое время считалось, что основными коренными источниками кристаллов алмаза являются исключительно месторождения, связанные с кимберлитами и лампроитами. Среди алмазоносных парагенезисов выделяются два типа: перидотитовый и эклогитовый, которые присутствуют в виде ксенолитов и минеральных включений в кристаллах алмаза, выносимых на поверхность Земли кимберлитовыми или лампроитовыми расплавами (Соболев, 1974). Кристаллы алмаза размером менее 0.5 мм были обнаружены в россыпях в различных регионах СССР, включая территории Украины, Северного Казахстана и России (Кашкаров и Полканов, 1964, 1972), что привело к открытию нового типа коренных алмазных месторождений, связанных с метаморфическими породами (Розен

и др., 1972; Лаврова и др., 1999; Летников и Нарсеев, 2016). Позднее информация о находках включений кристаллов алмаза стала появляться в работах (Sobolev and Shatsky, 1990; Dobretsov et al., 1995; Dobrzhinetskaya et al., 1995; Shatsky et al., 1995; Massonne, 1999; Mposkos and Kostopoulos, 2001; Stöckhert et al., 2001; Korsakov et al., 2002; Roermund et al., 2002; Massonne and Nasdala, 2003; Yang et al., 2003; Perraki et al., 2006; Majka et al., 2014; Klonowska et al., 2017), посвященных изучению различных комплексов по всему земному шару. Вместе с тем, большинство этих находок не были подтверждены независимыми исследователями. Благодаря уникальным физическим и химическим свойствам кристаллы алмаза, несмотря на их малый размер (10–20 микрон), встречающиеся в метаморфических породах, являются важными геодинамическими индикаторами. Находки алмазов в метаморфических породах свидетельствует о наличии высокobarического этапа, который протекал при температурах и давлениях, отвечающих поллю стабильности алмаза (950–1000 °C и > 4 ГПа). Одним из наиболее вероятных механизмов реализации столь высоких температур и давлений является погружение корового материала на мантийные глубины в субдукционно-коллизийных зонах (Smith, 1984; Dobretsov et al., 1995; Chopin, 2003).

В пределах Альпийско-Гималайского складчатого пояса метаморфические комплексы сверхвысоких давлений известны как в Альпах (Chopin, 1984, 2003), так и в Гималаях (O'Brien et al., 2001; Liou et al., 2004), но не известны на Памире. Вместе с тем, на Восточном Памире известны трубки взрыва, которые выносят на дневную поверхность ксенолиты гранулитов и эклогитов, впервые описанные Э. А. Дмитриевым (Дмитриев, 1976). Условия образования этих глубинных парагенезисов оценивались как 950–1000 °C и 3 ГПа (Лутков, 2003; Hacker et al., 2005). Эти оценки несколько ниже РТ параметров, необходимых для формирования кристаллов алмаза в мантии Земли, но при этом существует несколько публикаций, в которых упоминаются находки микрокристаллов алмаза (Лутков и Файзиев, 2007). Поэтому оценка перспектив потенциальной алмазоносности Таджикистана проводилась неоднократно (Хасанов, 2004; Лутков и Файзиев, 2007; Лутков и др., 2008), но основным направлением этих работ было выявление месторождений, связанных с кимберлитоподобными трубками взрыва. Относительно недавно, в работе Ли с соавторами (Li et al., 2023) в одном из образцов кианитсодержащего эклогита были получены оценки температуры и давления, отвечающие поллю стабильности алмаза, но при этом в этой работе не упоминаются достоверные находки кристаллов алмаза в исследованных ими образцах. В данной работе мы приводим результаты комплексного исследования ксенолитов глубинных пород из трубки «Эклогитовая», направленного на поиск метаморфогенных кристаллов алмаза в этих породах.

Методы

В данной работе мы использовали комплекс минералого-петрографических методов на базе ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН в ИГМ СО РАН. Изучение включений и взаимоотношений минералов в шлифах проводилось методами оптической микроскопии с использованием микроскопа Olympus BX51. Идентификация их состава проводилась с использованием электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU, оснащенного INCA EDS 450 системой микроанализа с детектором EDS X-Max-80 Silicon Drift Detector (Oxford Instruments), ускоряющим напряжением 20 кВ и ток пучка 1 нА, время набора спектра 20 с. Микрозондовые анализы (EMPA) были выполнены при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока 30 нА на рентгеновском микроанализаторе Jeol JXA-8100. КР-спектроскопические исследования были выполнены на автоматизированной системе Аругон (WITec), оснащенной лазерами 488 и 633 нм, мощность которых на поверхности образца составляла ~15 мВт. Объектив 100× (Zeiss NA 0.9) был использован при КР-картировании. Область картирования составляла определялась размером исследуемых кристаллов, при этом шаг картирования составлял 250–300 нм. Время накопления сигнала в каждой точке – 1 с.

Результаты и дискуссия

Наши предыдущие исследования (De Corte et al., 2000) алмазсодержащих пород Кокчетавского массива позволили установить, что для образования кристаллов алмаза в метаморфических породах необходимо выполнение нескольких условий.

(i) Наличие высоких температур и давлений на пике метаморфизма, отвечающих полю стабильности алмаза.

(ii) Наличие графита и/или карбонатов, вероятнее всего, являющихся источником углерода при формировании кристаллов алмаза.

(iii) Наличие флюида/расплава, выполняющего роль растворителя, способствующего образованию алмаза.

Поэтому при первичной обработке коллекции особое внимание уделялось выявлению образцов, содержащих графит, поскольку, как было показано ранее (De Corte et al., 2000), при отсутствии графита алмаз не был обнаружен даже в изофациальных ультравысокобарических породах, например, в эклогитах (Корсаков и др., 1998). При этом следует отметить, что в отличие от метаморфических комплексов, в которых эклогиты не являются алмазонасными породами, в ксенолитах эклогитов из трубки «Удачная» встречаются образцы графит- и алмазосодержащих разновидностей (Mikhailenko et al., 2016, 2020). Из коллекции, насчитывающей более 200 образцов, графитсодержащими разновидностями оказались лишь 15. Все образцы являются гранулитами, ни в одном из эклогитов графит обнаружен не был.

Графитсодержащие образцы гранулитов относятся к фельзитическим разновидностям гранулитов. Эти образцы сложены гранатом пироп-гроссуляр-альмандинового состава, кианитом, кварцем, калиевым полевым шпатом и иногда плагиоклазом. Практически все исследованные минералы являются незональными, и их представительные составы приведены табл. 1.

Таблица 1. Представительные анализы породообразующих минералов в плагиоклазсодержащих и без плагиоклазовых фельзитических гранулитах из трубки «Эклогитовая».

c = центр и r = край зерна, Grt = гранат, Kfs = калиевый полевой шпат, Pl = плагиоклаз

Table 1. Representative compositions of rock-forming minerals from plagioclase-bearing and plagioclase-free felsic granulites from «Eclogitovaya» pipe.

c = core and r = rim zone, Grt = garnet, Kfs = K-feldspar, Pl = plagioclase

Rock type	Pl-free felsic granulite				Pl-bearing felsic granulite					
Mineral	Grt		Kfs		Grt		Pl		Kfs	
Location	c	r	c	r	c	r	c	r	c	r
SiO ₂	38.18	37.92	65.95	65.99	38.50	38.41	59.94	60.52	65.72	65.85
TiO ₂	0.08	0.06	0.06	0.07	0.05	0.07	0.04	0.00	0.06	0.02
Al ₂ O ₃	21.05	21.22	18.76	18.64	21.47	21.40	24.65	24.17	18.90	19.23
Cr ₂ O ₃	0.02	0.03	0.00	0.02	0.05	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00
FeO	30.01	30.23	0.01	0.12	27.20	27.29	0.06	0.06	0.02	0.02
MnO	1.43	1.41	0.00	0.00	0.77	0.78	0.00	0.01	0.00	0.00
MgO	6.79	6.87	0.00	0.01	8.11	8.15	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	2.41	2.51	0.11	0.13	3.95	4.03	6.99	6.65	0.76	0.82
Na ₂ O	0.00	0.08	2.29	2.57	0.06	0.00	6.48	6.39	3.05	3.12
K ₂ O	0.01	0.02	12.89	12.53	0.00	0.02	1.45	1.82	11.35	11.16
Total	99.98	100.34	100.07	100.07	100.17	100.19	99.66	99.63	99.86	100.22

Особое внимание при исследовании уделялось морфологическим особенностям кристаллов и агрегатов графита, поскольку наши предыдущие исследования морфологии графита из высокостатических алмазонасных пород Кокчетавского массива (Korsakov et al., 2010, 2019) и продуктов экспериментов по графитизации алмаза (Korsakov et al., 2015) позволили выявить ряд закономерностей. Графит из ультравысокобарических пород нередко встречается в виде кубоидов и/или сферолитов, в ядрах которых могут встречаться кристаллы алмаза (Korsakov and Hermann, 2006). При графитизации алмаза в «сухой» системе сохраняются все мельчайшие детали исходного кристалла алмаза, а в присутствии водного флюида происходит растворение и переосаждение графита, при этом морфология исходного кристалла ни как не влияет на характер агрегата графита (Korsakov et al., 2015).

Графит во всех исследованных образцах встречается в виде идиоморфных включений в первичных высокобарических минералах (гранате и кyanите), а также в виде крупных кристаллов в матрице (рис. 1). Во многих образцах наблюдается зональное распределение включений графита в пределах порфиробластов граната или кyanита. Ядра подобных порфиробластов изобилуют включениями графита, кварца, реже рутила, циркона, монацита. Наряду с твердофазными включениями в ядрах диагностированы и расплавные включения (рис. 1 с-f). Следует отметить, что в исследованных нами образцах ксенолитов не наблюдались необычные морфологические типы графита

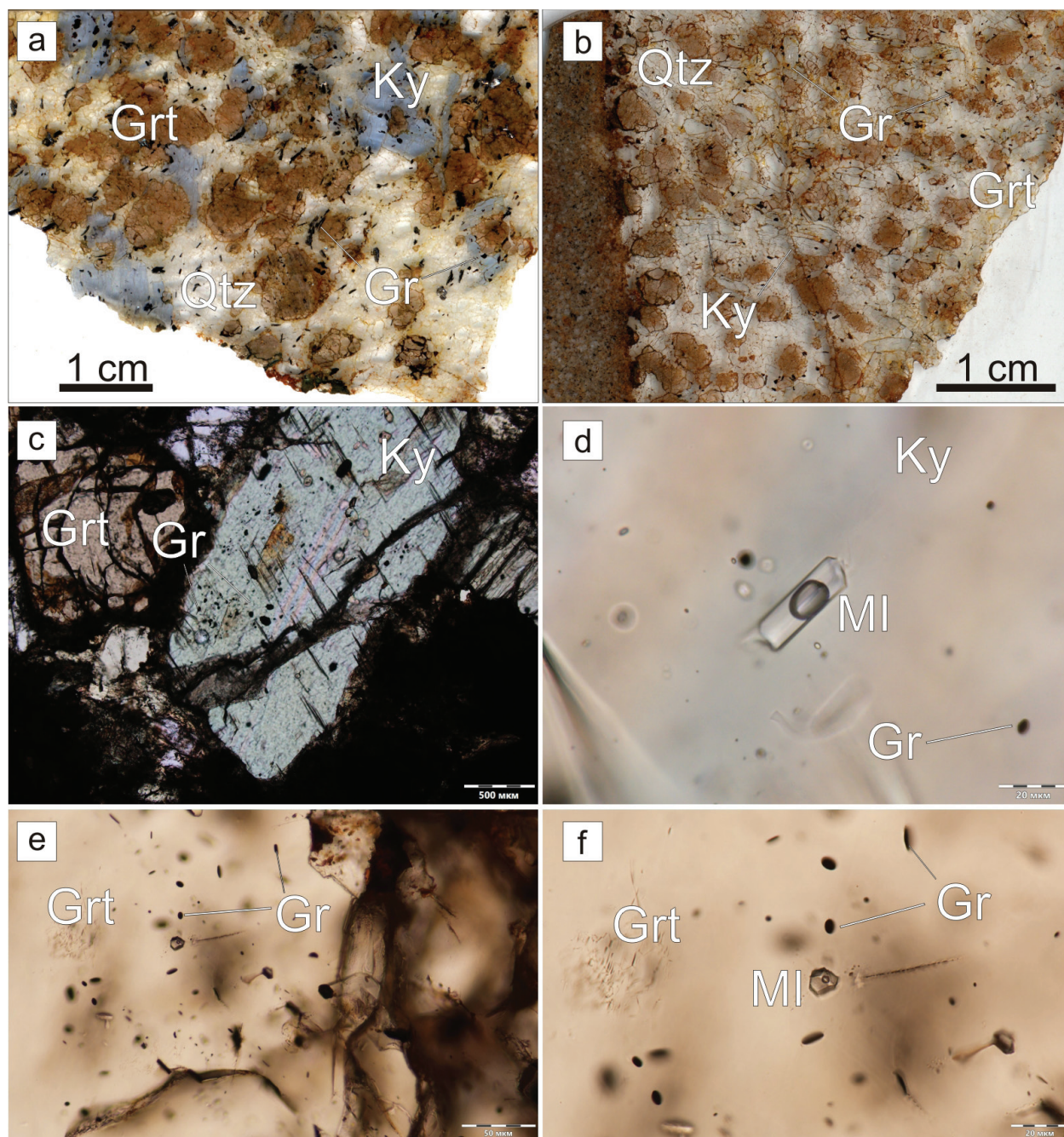


Рис. 1. Фотографии графитсодержащих гранат (Grt)-кианитовых (Ky) гранулитов: а, б – распределение кристаллов графита (Gr) в образце плагиоглазсодержащего и без плагиоклазового гранулит; с, d – расплавные включения (MI) и включения графита в порфиробласте кyanита; е, f – расплавные включения и включения графита гранате

Fig. 1. Photographs of graphite-bearing garnet (Grt)-kyanite (Ky) granulites: a, b – distribution of graphite (Gr) crystals in a sample of plagioclase-bearing and plagioclase-free granulite; c, d – melt inclusions (MI) and graphite inclusions in kyanite porphyroblasts; e, f – melt and graphite inclusions in garnets

(кубоиды, сферолиты и т. д.), установленные нами ранее в породах Кокчетавского массива (Korsakov et al., 2010, 2019).

КР-спектроскопические исследования включений графита позволили выявить лишь присутствие хорошо упорядоченного графита, что указывает на его образование при температуре более 650°C (рис. 2). Следует отметить, что иногда при КР-картировании в спектрах наблюдается интенсивный пик 1332 см^{-1} , являющийся диагностическим для кристаллов алмаза (Solin and Ramdas, 1970). Однако детальный анализ результатов КР-картирования показал, что все эти находки «включений» алмаза тяготеют к дефектам полировки (трещинки, выщерблены), и являются результатом контаминации образцов в процессе пробоподготовки. Ранее нами (Petraki et al., 2009) была разработана методика, позволяющая отличать природные кристаллы от синтетических кристаллов, используемых в процессе пробоподготовки. Ни в одном из образцов размер обнаруженных кристаллов алмаза не превосходит 2 микрон, а их спектроскопические характеристики полностью соответствуют таковым для алмазного порошка, который использовался при полировке пластинок.

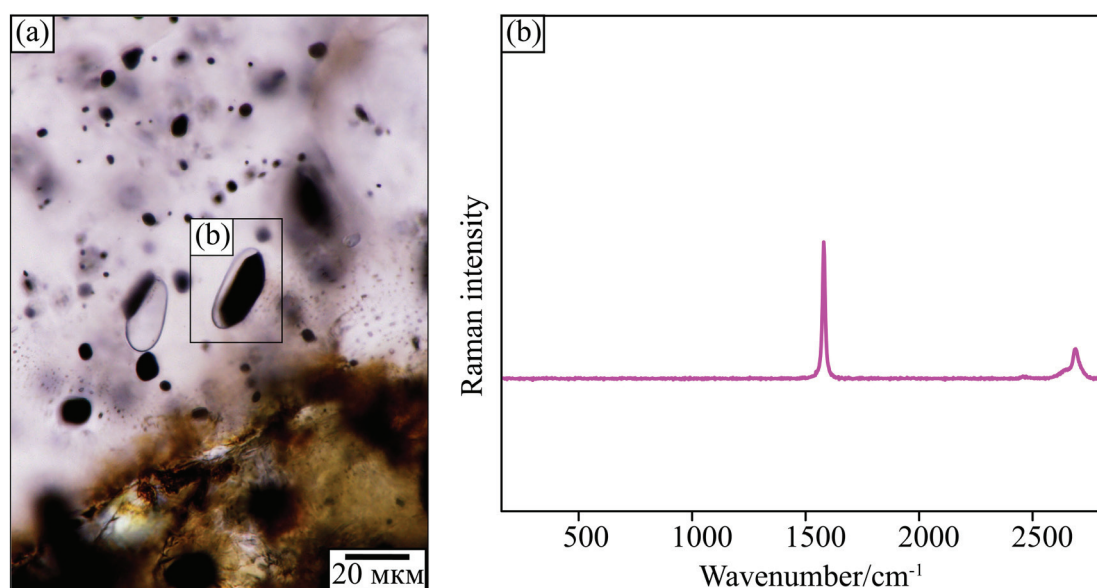


Рис. 2. Фотографии включений графита (а) в порфиробласте граната и КР-спектр этого включения (b)

Fig. 2. Photographs of graphite inclusions (a) in garnet porphyroblast and Raman spectrum of the graphite inclusions (b)

Также методами КР-спектроскопии нами были установлены составы флюидных обособлений в расплавных включениях. Смесь метана (CH_4) и CO_2 была зафиксирована во флюидных фазах расплавных включений в некоторых образцах, содержащих графит, тогда как в других образцах флюидные обособления представлены исключительно CO_2 . Состав стекол варьирует от риолитов до дацитов с высоким содержанием K_2O и содержанием H_2O не более 4 мас. % (Корсаков и др., 2025). Важная роль флюидов/расплавов в процессах алмазообразования хорошо известна. Большинство экспериментальных исследований (Чепуров и др., 1997; Sokol et al., 2001; Pal'yanov et al., 2002), направленных на получение относительно крупных и качественных кристаллов алмаза, используют различные растворители (металлические, карбонатные, карбонатно-силикатные, флюидные), так как прямой переход графита в алмаз без участия растворителя происходит при существенно более высоких температурах и давлениях (Leshchuk et al., 2002). Таким образом, можно констатировать выполнение как минимум двух необходимых условий для образования метаморфогенных кристаллов алмаза, а именно, присутствие флюида/расплава и графита.

Реконструкция температуры и давления формирования ассоциаций гранат-кианит-кварц-КПШ сопряжена с рядом сложностей, поскольку их формирование может происходить в очень широком диапазоне температур и давлений (Добрецов и др., 1974). Отсутствие ростовой зональности в кристаллах граната позволяет предполагать высокие температуры пика метаморфизма, в ре-

зультате чего произошла гомогенизация их состава. Присутствие хорошо упорядоченного графита также свидетельствует о высокой температуре ($> 650^{\circ}\text{C}$). образования этих ассоциаций. Наличие расплавных включений в порфиробластах граната и кианита позволяют получить минимальные давления более 2 ГПа при температуре $950\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ (Корсаков и др., 2025). Условия пика метаморфизма для схожих ассоциаций (гранат-кианит-кварц-тройной полевой шпат) из массива Гранулитибирге оценивались как $950\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ при давлении 2.8 ГПа (O'Brien and Rötzler, 2003). Экспериментальные исследования позволяют предполагать, что изученные нами образцы гранулитов можно отнести к «сухим», поскольку в водосодержащих условиях КПШ замещается при давлении 2 ГПа и 650°C К-кимритом, в более высокотемпературной области фенгит является стабильной фазой практически во всем интересующем нас диапазоне. Для плагиоклазсодержащих разновидностей в качестве оценки максимальных величин давления может быть использована кривая разложения альбита. В высокотемпературной области ($T > 1100^{\circ}\text{C}$) давление может достигать 3 ГПа, что очевидно не достаточно для образования алмаза, поскольку даже при 1000°C давление должно превышать 4 ГПа. Следует отметить, что безплагиоклазовые разновидности могут быть стабильны и при более высоких давлениях, о чем свидетельствуют находки коэсит-санидиновых эклогитов из кимберлитовой трубки Робертс Виктор (Smyth and Hatton, 1977; Schulze and Helmstaedt, 1988).

Реконструированные китайскими коллегами (Li et al., 2023) более высокие РТ-параметры были зафиксированы в ксенолитах кианитсодержащих эклогитов. В нашей коллекции ни графит, ни алмаз не были диагностированы ни в одном из ксенолитов эклогитов, что, вероятно, связано с особенностями состава протолита. Как отмечалось ранее, в метаморфических комплексах сверхвысоких давлений эклогиты являются изофациальными алмазсодержащим метаосадочным породам, но при этом сами не содержат кристаллы алмаза (Корсаков и др., 1998). Этот факт может свидетельствовать о том, что графитсодержащие разновидности гранулитов являются метаосадками. Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C} = -14.5\text{--}20.1\text{‰}$), полученный ранее для этих образцов соответствует коровому источнику углерода (Podugolnikova et al., 2025). Вероятнее всего, мантийный метасоматоз, с которым связывают образование алмаза и графита в ксенолитах эклогитов из кимберлитов (Shatsky et al., 2008; Mikhailenko et al., 2016; 2021), не был проявлен при формировании ксенолитов трубки «Эклогитовая» (Восточный Памир).

Заключение

Проведенное нами комплексное минералого-геохимическое исследование высокобарических ксенолитов гранулитов и эклогитов из трубки «Эклогитовая» (Восточный Памир) позволяет сделать следующие выводы.

На сегодняшний день в ксенолитах гранулитов был диагностирован лишь графит. Во всех исследованных нами образцах эклогитов графит не обнаружен.

Наличие расплавных включений в гранате и кианите, сосуществующих с включениями графита, свидетельствует о существовании расплава вблизи пика метаморфизма. Вероятнее всего, если бы давления и температуры пика метаморфизма соответствовали полю стабильности алмаза, то расплав/флюид мог выступать в роли среды перекристаллизации графита в алмаз.

Наличие расплавных включений в высокобарических минералах, таких как гранат и кианит, указывает на минимальные давления > 2 ГПа, так как при более низких давлениях силлиманит является стабильной фазой. Условия пика метаморфизма графит- и плагиоклазсодержащих гранулитов может быть ограничено 3 ГПа и $950\text{--}1000^{\circ}\text{C}$, что недостаточно для образования алмаза. В безплагиоклазовых разновидностях условия пика метаморфизма могли превышать указанные величины, но достоверных находок включений кристаллов алмаза размером более 2 микрон не установлено.

Находки кристаллов алмаза (с размером кристаллов менее 2 микрон), приуроченных к дефектам поверхности образца (каверны и трещины), а также вскрытым флюидным обособлениям расплавных включений, указывают на то, что они являются результатом контаминации в процессе пробоподготовки. КР-спектроскопические исследования алмазных порошков, используемых при поли-

ровке образцов, и обнаруженных кристаллов алмаза идентичны, что подтверждает ранее сделанный вывод о контаминации образцов.

Образование алмаза в наиболее глубоких ксенолитах эклогитов из трубки «Эклогитовая» лимитировалось наличием свободного углерода, тогда как в ксенолитах гранулитов из этой же трубки давление не соответствовало полю стабильности алмаза.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-17-00164.

Литература

1. Дмитриев Э. А. Кайнозойские калиевые щелочные породы Восточного Памира. Душанбе. Изд-во: До-ниш, 1976. 168 с.
2. Добрецов Н. Л., Соболев В. С., Соболев Н. В., Хлестов В. В. Фации регионального метаморфизма вы-соких давлений. М. Изд-во: Недра, 1974. 328 с.
3. Кашкаров И. Ф., Полканов Ю. А. О некоторых особенностях алмазов из титаноносных россыпей Се-верного Казахстана: Труды минералогического музея им. Ферсмана. 1972. Вып. 21. С. 183–185.
4. Кашкаров И. Ф., Полканов Ю. А. О находке алмазов в титано-циркониевых песках // Доклады АН СССР. М. Изд-во: Наука, 1964. Т. 157. С. 1129–1130.
5. Корсаков А. В., Чупин В. П., Кузьмин Д. В., Похиленко Н. П. Включения расплава в минералах ксе-нолитов гранулитов из диатрем Восточного Памира (Таджикистан): свидетельства инконгруэнтного плавления на границе коры и мантии // Доклады АН. М. Изд-во: Наука, 2025. Т. 520. 168 с.
6. Корсаков А. В., Шацкий В. С., Соболев Н. В. Первая находка коэсита в эклогитах Кокчетавского мас-сива // Доклады РАН. 1998. Т. 360, № 1. С. 77–81.
7. Лаврова Л. Д., Печников В. А., Плешаков А. М., Надеждина Е. Д., Шуколюков Ю. А. Новый генетиче-ский тип алмазных месторождений. М. Изд-во: Научный мир, 1999. 221 с.
8. Летников Ф. А., Нарсеев В. А. Алмазное месторождение Кумдыколь в Северном Казахстане // Геоло-гия и Охрана недр. Казахстан. Изд-во: КазГео, 2016. № 3 (60). С. 7–14.
9. Лутков В. С., Бабаев А. М., Файзиев А. Р. Трубки взрыва щелочных базитов Южного Тянь-Шаня: воз-раст, химизм, генезис, алмазоносность // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отде-ление физико-математических, химических, геологических и технических наук. Душанбе. Изд-во: Ака-демии наук Республики Таджикистан, 2008. С. 65–69.
10. Лутков В. С., Файзиев А. Р. Южно-Тянь-Шанский пояс алмазоносных щелочных базитов // Докла-ды Академии наук. Душанбе. Изд-во: Академии наук Республики Таджикистан, 2007. Т. 413, № 2. С. 218–220.
11. Лутков В. С. Петрохимическая эволюция и генезис калиевой пироксенит-эклогит-гранулитовой ассо-циации: мантийные и коровые ксенолиты в неогеновых фергуситах южного Памира, Таджикистан //Ге-охимия. 2003. № 3. С. 254–265.
12. Розен О. М., Зорин Ю. М., Заячковский А. А. Обнаружение алмаза в связи с эклогитами в докембрии Кокчетавского массива // Доклады АН СССР. 1972. Т. 203. С. 674–676.
13. Хасанов А. Х. Закономерности размещения, геодинамика и возможная алмазоносность кимберлитоп-добных трубок взрыва Центрального Таджикистана. Душанбе. Изд-во: Деваштич, 2004. 168 с.
14. Cherpurov A. I., Fedorov I. I., Sonin V. M. An experimental modeling of diamond-forming processes. Novosibirsk: SB RAS, UIGGM, 1997.
15. Chopin C. Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into the mantle. Earth and Planetary Science Letters 2003. V. 212. P. 1–14.
16. Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of Western Alps: a first record and some consequences. Contributions to Mineralogy and Petrology. 1984. V. 86. P. 107–118.
17. De Corte K., Korsakov A., Taylor W. R., Cartigny P., Ader M., Paepe P. D. Diamond growth during ultrahigh- pressure metamorphism of the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. 2000. The Island Arc. V. 9. P. 284–303.
18. Dobretsov N. L., Sobolev N. V., Shatsky V. S., Coleman R. G., Ernst W. G. Geotectonic evolution of diomondiferous paragneisses, Kokchetav complex, northern Kazakhstan. The geologic enigma of ultrahigh- pressure crustal rocks within a Paleozoic foldbelt. 1995. The Island Arc, V. 4. P. 267–279.
19. Dobrzhinetskaya L. F., Eide E., Korneliussen A., Larsen R., Millege J., Posokhova T., Smith D. C., Sturt B. A., Taylor W. R., Tronnes R. Diamond in metamorphic rocks of the western Gneiss Region in Norway // Geology. 1995. V. 23. P. 597–600.

20. Hacker B. R., Luffi P., Lutkov V., Minaev V., Ratschbacher L., Plank T., Ducea M., Patiño-Douce A., McWilliams M., Metcalf J. Near-Ultrahigh Pressure Processing of Continental Crust: Miocene Crustal Xenoliths from the Pamir // *Journal of Petrology*. 2005. V. 46. P. 1661–1687. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi030>.
21. Klonowska I., Janák M., Majka J., Petrik I., Froitzheim N., Gee D. G., Sasinková V. Microdiamond on Åreskutan confirms regional UHP metamorphism in the Seve Nappe Complex of the Scandinavian Caledonides // *Journal of Metamorphic Geology*. 2017. V. 35. P. 541–564. <https://doi.org/10.1111/jmg.12244>.
22. Korsakov A. V., Hermann J. Silicate and carbonate melt inclusions associated with diamonds in deeply subducted carbonate rocks // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. V. 241. P. 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.10.037>.
23. Korsakov A. V., Perraki M., Zedgenizov D. A., Bindi L., Vandenabeele P., Suzuki A., Kagi H. Diamond-Graphite Relationships in Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks from the Kokchetav Massif, Northern Kazakhstan // *Journal of Petrology*. 2010. V. 51. P. 763–783.
24. Korsakov A. V., Rezvukhina O. V., Jaszczak J. A., Rezvukhin D. I., Mikhailenko D. S. Natural Graphite Cuboids // *Minerals*. 2019. V. 9. P. 110. <https://doi.org/10.3390/min9020110>.
25. Korsakov A. V., Shatsky V. S., Sobolev N. V., Zayachkovsky A. A. Garnet-biotite-clinzoisite gneisses: a new type of diamondiferous metamorphic rocks of the Kokchetav massif // *European Journal of Mineralogy*. 2002. V. 14. P. 915–929.
26. Korsakov A. V., Zhimulev E. I., Mikhailenko D. S., Demin S. P., Kozmenko O. A. Graphite pseudomorphs after diamonds: An experimental study of graphite morphology and the role of H₂O in the graphitisation process // *Lithos*. 2015. V. 236–237. P. 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.08.012>.
27. Leshchuk A., Novikov N., Levitas V. Thermomechanical model of the graphitenitS' diamond phase transformation // *Journal of Superhard Materials*. 2002. V. 24. P. 44–52.
28. Li Y.-P., Ding L., Robinson A. C., Liu D.-L., Xie J., Zhang L.-Y., Zhao C.-Y., Yue Y.-H., Liu Y., Oimuhhammadzoda I., Gadoev M., Rajabov N. Was cratonic Asia deeply subducted beneath the Pamir? Evidence from P–T conditions and tectonic affinities of Cenozoic Pamir crustal xenoliths // *Journal of Metamorphic Geology*. 2023. V. 41. P. 925–965. <https://doi.org/10.1111/jmg.12723>.
29. Liou J., Tsujimori T., Zhang R., Katayama I., Maruyama S. Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: the Himalayan model // *International Geology Review*. 2004. V. 46. P. 1–27.
30. Majka J., Rosén Å., Janák M., Froitzheim N., Klonowska I., Manecki M., Sasinková V., Yoshida K. Microdiamond discovered in the Seve Nappe (Scandinavian Caledonides) and its exhumation by the “vacuum-cleaner” mechanism // *Geology*. 2014. V. 42. P. 1107–1110. <https://doi.org/10.1130/G36108.1>.
31. Massonne H.-J. A new occurrence of microdiamonds in quartzfeldspathic rocks of the Saxonian Erzgebirge, Germany and their metamorphic evolution // *Proceedings of 7th International Kimberlite Conference*. 1999. P. 533–539.
32. Massonne H.-J., Nasdala L. Characterization of an early metamorphic stage through inclusions in zircon of a diamondiferous quartzofeldspathic rock from the Erzgebirge, Germany // *American Mineralogist*. 2003. V. 88. P. 883–889.
33. Mikhailenko D. S., Aulbach S., Korsakov A. V., Golovin A. V., Malygina E. V., Gerdes A., Stepanov A. S., Xu Y.-G. Origin of Graphite–Diamond-Bearing Eclogites from Udachnaya Kimberlite Pipe // *Journal of Petrology*. 2021. V. 62 P. 33. <https://doi.org/10.1093/petrology/egab033>.
34. Mikhailenko D. S., Korsakov A. V., Zelenovskiy P. S., Golovin A. V. Graphite-diamond relations in mantle rocks: Evidence from an eclogitic xenolith from the Udachnaya kimberlite (Siberian Craton) // *American Mineralogist*. 2016. V. 101. P. 2155–2167. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5657>.
35. Mikhailenko D. S., Stagno V., Korsakov A. V., Andreozzi G. B., Marras G., Cerantola V., Malygina E. V. Redox state determination of eclogite xenoliths from Udachnaya kimberlite pipe (Siberian craton), with some implications for the graphite/diamond formation // *Contrib Mineral Petrol*. 2020. V. 175. P. 107. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01748-3>.
36. Mposkos E. D., Kostopoulos D. K. Diamond, former coesite and supersilicic garnet in metasedimentary rocks from the Greek Rhodope: a new ultrahigh-pressure metamorphic province established // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. V. 192. P. 497–506.
37. O'Brien P. J., Rötzler J. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics // *Journal of Metamorphic Geology*. 2003. V. 21. P. 3–20.
38. O'Brien P. J., Zotov N., Law R., Khan M. A., Jan M. Q. Coesite in Himalayan eclogite and implications for models of India-Asia collision // *Geology*. 2001. V. 29. P. 435–438.
39. Pal'yanov Y. N., Sokol A., Borzdov M., Khokhryakov A. Fluid-bearing alkaline carbonate melts as the medium for the formation of diamonds in the Earth's mantle: an experimental study // *Lithos*. 2002. V. 60. P. 145–159.

40. Perraki M., Korsakov A. V., Smith D. C., Mposkos E. Raman spectroscopic and microscopic criteria for the distinction of microdiamonds in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from diamonds in sample preparation materials // *American Mineralogist*. 2009. V. 94. P. 546–556. <https://doi.org/10.2138/am.2009.2973>.
41. Perraki M., Proyer A., Mposkos E., Kaindl R., Hoinkes G. Raman micro-spectroscopy on diamond, graphite and other carbon polymorphs from the ultrahigh-pressure metamorphic Kimi Complex of the Rhodope Metamorphic Province, NE Greece // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. V. 241. P. 672–685.
42. Podugolnikova E. E., Korsakov A. V., Mikhailenko D. S., Odinaev S. A., Gadoev M. L. Raman spectroscopic study and isotopic composition of graphite inclusions in HP xenoliths from «Eclogitovaya» pipe (the Eastern Pamir) "Inclusions of Disordered Graphite in Kyanite-bearing Felsic Granulite (the Eastern Pamir)" // *Journal of Raman Spectroscopy* submitted. 2025.
43. Roermund H. L. M. van, Carswell D. A., Drury M. R., Heijboer T. C. Microdiamonds in a megacrystic garnet websterite pod from Bardane on the island of Fjortoft, western Norway: Evidence for diamond formation in mantle rocks during deep continental subduction // *Geology*. 2002. V. 30. P. 959–962. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0959:MIAMGW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0959:MIAMGW>2.0.CO;2).
44. Schulze D. J., Helmstaedt H. Coesite-Sanidine Eclogites from Kimberlite: Products of Mantle Fractionation or Subduction? // *The Journal of Geology*. 1988. V. 96. P. 435–443. <https://doi.org/10.1086/629238>.
45. Shatsky V., Ragozin A., Zedgenizov D., Mityukhin S. Evidence for multistage evolution in a xenolith of diamond-bearing eclogite from the Udachnaya kimberlite pipe // *Lithos*. 2008. V. 105. P. 289–300.
46. Shatsky V. S., Sobolev N. V., Vavilov M. A. Diamond-bearing metamorphic rocks of the Kokchetav massif (northern Kazakhstan) // *Ultra-High Pressure Metamorphism*. Cambridge University Press. 1995. P. 427–455.
47. Smith D. C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics // *Nature*. 1984. V. 310. P. 641–644.
48. Smyth J. R., Hatton C. J. A coesite-sanidine grosspydrite from the Roberts Victor kimberlite // *Earth and Planetary Science Letters*. 1977. V. 34. P. 284–290. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90012-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90012-7).
49. Sobolev N. V., Shatsky V. S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation // *Nature*. 1990. V. 343. P. 742–746. <https://doi.org/10.1038/343742a0>
50. Sokol A. G., Pal'yanov Y. N., Pal'yanova G. A., Khokhryakov A. F., Borzdov Y. M. Diamond and graphite crystallization from C-O-H fluids // *Diamond and Related Materials*. 2001. V. 10. P. 2131–2136.
51. Solin S. A., Ramdas A. K. Raman spectrum of diamond. *Phys. Rev.* 1970. B 1. P. 1687–1698.
52. Stöckhert B., Duyster J., Trepmann C., Massonne H.-J. Microdiamond daughter crystals precipitated from supercritical C-O-H fluids included in garnet, Erzgebirge, Germany // *Geology*. 2001. V. 29. P. 391–394.
53. Yang J., Xu Z., Dobrzhinetskaya L. F., Green H. W., Pei X., Shi R., Wu C., Wooden J. L., Zhang J., Wan Y., Li H. Discovery of metamorphic diamonds in central China: an indication of a > 4000-km-long zone of deep subduction resulting from multiple continental collisions // *Terra Nova*. 2003. V. 15. P. 370–379.