

Э.Г.ОДАРИЧЕНКО, Ф.Г.РЕЙФ, Б.Л.ЗАЛИЩАК, В.А.ПАХОМОВА

## Генезис корунда по термобарогеохимическим данным (месторождение Незаметнинское, Приморский край)

*Драгоценные камни с давних пор привлекают внимание людей своей красотой и уникальностью. Но много ли мы знаем о том, где они рождаются и растут в природе? Эта статья посвящена проблеме генезиса корунда (сапфира) из россыпи Незаметнинского месторождения. В ней приведены данные о геологии этого месторождения, минеральном парагенезисе корунда и особенностях состава материнской среды, из которой происходила его кристаллизация.*

**Genesis of corundum according to the thermobarogeochemical data (Nezametninskoye deposit, Primorye).** E.G.ODARICHENKO (Far Eastern Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok), F.G.REYF (Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude), B.L.ZALISHCHAK, V.A.PAKHOMOVA (Far Eastern Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

*Gems attract attention of people by their beauty and uniqueness for a long time. But how much do we know about places of their formation and growth in nature? Genesis of corundum (sapphire) from placer of Nezametninskoye deposit is considered. Data on geology of this deposit, mineral paragenesis of corundum and composition features of the parent substance, from which corundum formed, are given.*

Проблема происхождения корунда всегда вызывала у геологов большой интерес и служила предметом острых дискуссий. На наш взгляд, в доступных литературных источниках степень достоверности фактического материала, характеризующего условия образования корунда, невысока, что связано со многими обстоятельствами. Как правило, обсуждаются корунды из россыпей, в то время как редкие сведения о коренных месторождениях не дают достаточного представления о геологии, петрографии и других важных характеристиках пород, изобилуют неопределенностями в диагностике пород и минералов, последовательности их образования. Практически отсутствуют в литературе сведения о физико-химических параметрах образования природных корундов, за исключением нескольких работ, в которых данные о температурных условиях приведены по результатам исследования других минералов корундового парагенезиса. Большинство зарубежных публикаций о корундах ориентированы на рассмотрение экономических показателей сырья и месторожде-

---

ОДАРИЧЕНКО Элла Геннадьевна, ЗАЛИЩАК Борис Леонидович – кандидат геолого-минералогических наук, ПАХОМОВА Вера Алексеевна – кандидат геолого-минералогических наук (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток), РЕЙФ Феликс Григорьевич – доктор геолого-минералогических наук (Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ).

Работа выполнена при поддержке Дальневосточного отделения РАН, проект № 03–3–Г–08–082.

ний. По этим причинам трактовка генезиса многих известных месторождений затруднена.

В настоящей работе приведены конкретные данные о корунде Незаметнинского месторождения, которые позволяют обоснованно судить о его происхождении.

Незаметнинское месторождение золота с благородным корундом и цирконом открыто З.А.Конюховым в начале тридцатых годов прошлого столетия. В числе его исследователей И.А.Пугачев и М.Т.Чудинов (1946–1948 гг.), А.И.Животовская (1953 г.), Л.К.Пономаренко (1959 г.), В.А.Никогосян (1970 г.), А.Ф.Жигула (1989 г.), О.П.Макаров, В.И.Дахин (1991 г.) и другие. Их работы главным образом направлены на выяснение геолого-структурных, минералогических, геохимических особенностей месторождения, характера окорундных изменений и других геолого-генетических признаков, а также на решение проблемы происхождения золотой минерализации. Проблема генезиса корунда считалась в лучшем случае второстепенной и серьезно не рассматривалась. Вопрос о происхождении корунда, обнаруженного в золотоносной россыпи, остается до сих пор спорным. Анализ результатов многолетних детальных поисковых и разведочных работ свидетельствует о повсеместной пространственной совмещенности золота и корунда в россыпи (обогащенность приплотиковой части аллювиальных отложений золотом, корундом и гиацинтом). Поэтому стоит рассмотреть специфику геологического строения района месторождения.

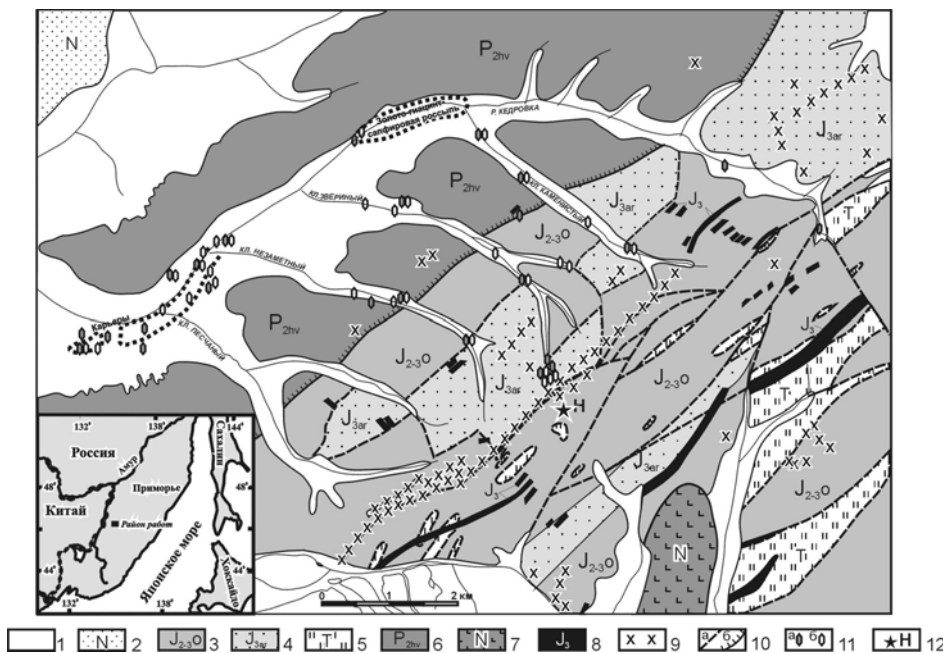


Рис. 1. Схематическая геологическая карта бассейна р. Кедровка, Приморский край (по А.А.Сясько, 1992 г. и А.Т.Кандаурову, 1994 г.). 1 – четвертичные и современные отложения; 2 – неогеновые конгломераты, песчаники, глины; 3 – средне-верхнеюрские турбидиты; 4 – верхнеюрские алевриты и песчаники; 5 – триасовые плитчатые кремни, кремнисто-глинистые породы; 6 – верхнепермские песчаники, аргиллиты, алевриты (аллохтон); 7 – неогеновые базальты; 8 – позднеюрские диориты, габбродиориты, габбро, спессартиты, долериты, базальты; 9 – выходы тел раннемеловых гранитоидов; 10 – разрывные нарушения: а – разломы, б – надвиги; 11 – находки в россыпи: а – корунда, б – циркона; 12 – Незаметнинский шток гранит-порфиров

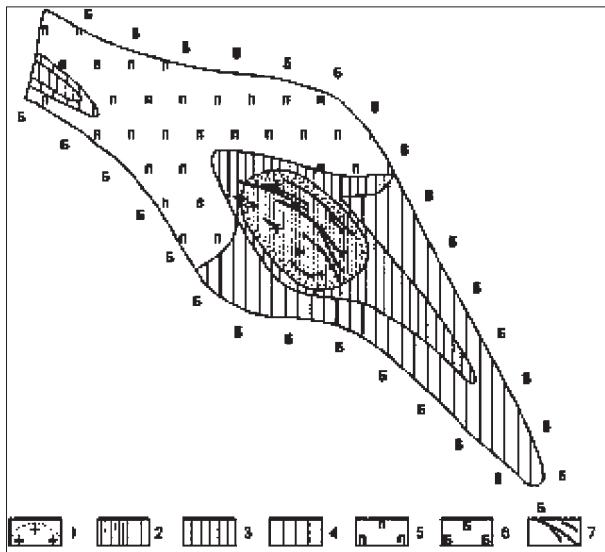


Рис. 2. Схема метасоматической зональности Незаметнинского месторождения (по материалам О.П.Макарова, В.И.Дахина, Н.А.Кукушкина и др., 1991 г.). 1 – контур штока гранит-порфиров; 2 – грейзены (кварц-серицит-мусковитовые и кварц-мусковитовые породы); 3, 4 – осветленные породы (3 – кварц-серицитовые и кварц-серицит-альбитовые, 4 – кварц-альбитовые); 5 – пропилиты (кварц-альбит-эпидот-актинолитовые породы); 6 – биотитовые роговики; 7 – кварцево-рудные жилы

Широко распространены в районе месторождения магматические образования, прорывающие докайнозойские осадочные породы. Среди них биотитовые граниты, граносиениты, гранодиориты, аляскиты, плагиограниты, гранит-порфиры, кварцевые диориты, базальтоиды и габброиды. Один из выходов предполагаемой на глубине гранитной интрузии площадью 15 км<sup>2</sup> обнажается в виде штока гранит-порфиров в верховьях ключа Незаметный (О.П.Макаров, В.И.Дахин, Н.А.Кукушкин и др., 1991 г.). Дайковый комплекс широко проявлен и представлен гранит-порфирами, аляскитами, гранодиоритами, кварцевыми диоритами, спессартитами, вогезитами, долеритами и габброидами.

По данным О.П.Макарова и др. (1991 г.), метаморфическим преобразованиям в той или иной степени подвергнуты все разновидности пород месторождения, за исключением миоценовых базальтов. Толщи ороговикованных пород образуют на площади месторождения купольную структуру (около 4 км в поперечнике). Большая часть метасоматитов расположена в пределах полей ороговикованных пород и представлена грейзенами, осветленными породами и пропилитами (рис. 2).

Грейзены представлены кварц-мусковитовыми и кварц-серицит-мусковитовыми фациями, развитыми по гранит-порфирам штока, дайкам гранодиорит-порфиров и вмещающим штоку кремнисто-глинистым сланцам. Мощность зоны грейзенизации в экзоконтакте штока составляет от 1 до 10 м. Зону грейзенизации обрамляют осветленные породы, сложенные кварц-серицитовыми, кварц-серицит-альбитовыми, кварц-альбитовыми метасоматитами. Во внутренней части зоны осветления преобладают кварц и серицит, во внешней – кварц и альбит, второстепенные минералы: хлорит, турмалин, пирит и арсенопирит. Наиболее интенсивному кварц-альбитовому замещению подвержены кремнисто-глинистые сланцы. Кварц-альбит-

Россыпное месторождение золота с благородным корундом и цирконом расположено в пределах Самаркинской аккреционной призмы Сихотэ-Алиня (рис. 1), сложенной средне-позднеюрскими турбидитами с аллохтонными образованиями верхней перми и пластинами кремней и кремнисто-глинистых пород триаса [10]. Все породы смяты в сложные складки и разбиты многочисленными разрывными нарушениями преимущественно северо-восточного простирания. Кайнозойские отложения слагают долины р. Кедровка и ее левых притоков и представлены слабо диагенезированными гравеллитами, конгломератами и аргиллитоподобными глинами.

эпидот-актинолитовые пропилиты развиты в северо-западной части Незаметнинского штока и пространственно тяготеют к внешней зоне.

**Методика исследования.** Известно, что для решения проблемы генезиса любого минерала необходимо с достаточной степенью надежности установить его парагенетическую ассоциацию, отражающую единые условия образования сосуществующих минералов. Для определения парагенезиса корунда существует несколько способов: первый предполагает исследование сингенетичных включений в корунде; второй – изучение его сростков с другими минералами; третий, как дополнительная информация о совместно образующихся с корундом минералах, – исследование минералов-спутников. Из всех перечисленных источников информации по степени достоверности на первом месте стоят сингенетичные включения, которые сохраняются в кристаллах корунда длительное время вследствие его высокой устойчивости и, таким образом, являются надежными реперами химизма среды и термодинамических условий роста монокристаллов корунда в природе. Минеральные же сростки существуют длительный промежуток времени в условиях открытой системы и могут подвергаться воздействию метасоматоза и другим вторичным изменениям, что существенно снижает степень достоверности полученной по ним генетической информации.

Поэтому ведущим методом для решения проблемы генезиса корунда нами избран термобарогеохимический в комплексе с современными методами локального исследования микрообъектов. Он считается одним из самых точных и надежных исследовательских инструментов. Основным объектом исследования термобарогеохимии являются микровключения – законсервированные в вакуолях микропорции минералообразующих сред. Включения содержат важнейшую информацию о составе, концентрации, агрегатном состоянии, температуре и давлении, которые существовали при минералообразовании. По включениям в минерале можно проследить историю изменения химизма и термодинамических параметров среды. Таким образом, термобарогеохимия изучает непосредственно маточную минералообразующую среду в ее статике и динамике [7, 8].

Материалом для исследования послужили геологические образцы, собранные сотрудниками геммологической лаборатории ДВГИ ДВО РАН в процессе целенаправленных полевых исследований на площади Незаметнинского рудного поля в период 2000–2002 гг. После визуально-оптического наблюдения образцов корунда под биноклем были отобраны корунды, содержащие включения. Отобранные кристаллы помещались в полистирол и полировались сначала на алмазных кругах с различной крупностью зерен, а по мере приближения включений к поверхности – на 15-, 10-, 3- и 1-микронных алмазных пастах, что обеспечивало полировку высокого качества как самих корундов, так и значительно более мягких минеральных и расплавных включений. Кроме того, из образцов корунда были изготовлены плоскопараллельные, отшлифованные с обеих сторон пластинки различной толщины (1–5 мм) в зависимости от их прозрачности. Затем они были просмотрены под микроскопом при 100–1000-кратном увеличении с целью анализа объемного распределения включений и их привязки к определенным кристаллографическим направлениям и зонам роста. Все это дало возможность синхронизировать включения и проследить тренд изменения их состава в процессе роста корунда. Такой метод изучения включений позволил получить уникальную информацию об условиях и среде кристаллизации корунда. Результаты анализов приведены в табл. 1–5.

**Минеральные и расплавные включения в корундах.** Визуально-оптическое исследование фазового наполнения включений в корундах Незаметнинского месторождения позволило выделить среди них три группы: минеральные, расплавные

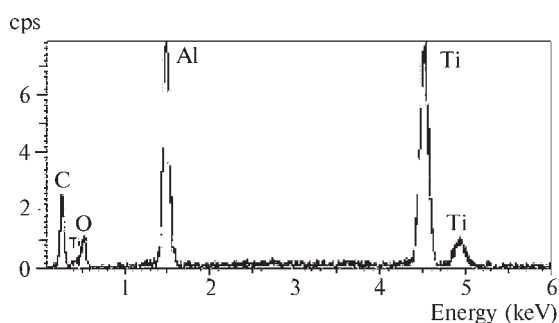
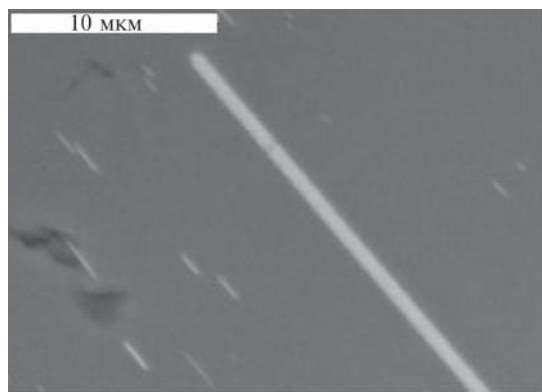


Рис. 3. Включения рутила в корунде (отраженные электроны) и его качественный спектр

и газово-жидкие. Мы не будем останавливаться на характеристике последней группы, поскольку результаты наших генетических построений основаны исключительно на информации, полученной по сингенетичным расплавленным и минеральным включениям.

Сингенетичные *минеральные* включения представлены рутилом, альбитом, цинксодержащим герцинитом, колумбитом, цирконом, флюоритом и монацитом [5, 6, 9, 12]. Большая часть из перечисленных минеральных включений в незаметнинских корундах установлена нами впервые, за исключением герцинита и колумбита, обнаруженных в 1998 г. А.С.Ананьевым с соавторами [1]. Сингенетичность указанных минеральных включений в кристаллах корунда подтверждается наличием индукционных поверхностей, угнетенно-

стью форм минеральных индивидов, эпитаксиальным характером срастания с корундом-хозяином, а также особенностями расположения в кристаллах.

В коричневых, синих, голубых, сине-зеленых прозрачных и просвечивающих корундах (см. цв. вкл. в журн. «Вестник ДВО РАН». 2003. № 6) встречены тонкие коричневые, красновато-коричневые иголки рутила различной длины, скрещивающиеся в трех различных направлениях под углами 60/120°. Они диагностированы под поляризационным микроскопом, характеризуются высоким показателем преломления больше 2,5 (у корунда 1,76) – и очень высоким двупреломлением. Также рутил определен качественно (рис. 3) с помощью электронного микроскопа JSM-5300, оборудованного аналитической приставкой – энергодисперсионным спектрометром LINK ISIS. Малая толщина иголок (~1–2 мкм) не позволила выполнить количественный анализ, поскольку диаметр зонда составлял порядка 5 мкм и, следовательно, при проведении микрозондового анализа захват матрицы корунда был неизбежен. Возможность присутствия тончайших иголок рутила в корунде обсуждается в ряде публикаций [11, 13], но все дискуссионные моменты также связаны с техническими возможностями аналитических приборов. В частности, S. Saminpanya сделал вывод, что для утверждения или опровержения правильности диагностики игольчатых включений в изученных им с помощью микроанализатора CAMECA-SX100 корундах из Таиланда необходимо использовать другие методики [13].

Альбит образует бесцветные прозрачные кристаллы неправильной, редко идиоморфной формы размером до 70 мкм (рис. 4, а; табл. 1). Цинксодержащий герцинит представлен октаэдрическими и ромбо-додекаэдрическими кристаллами чер-



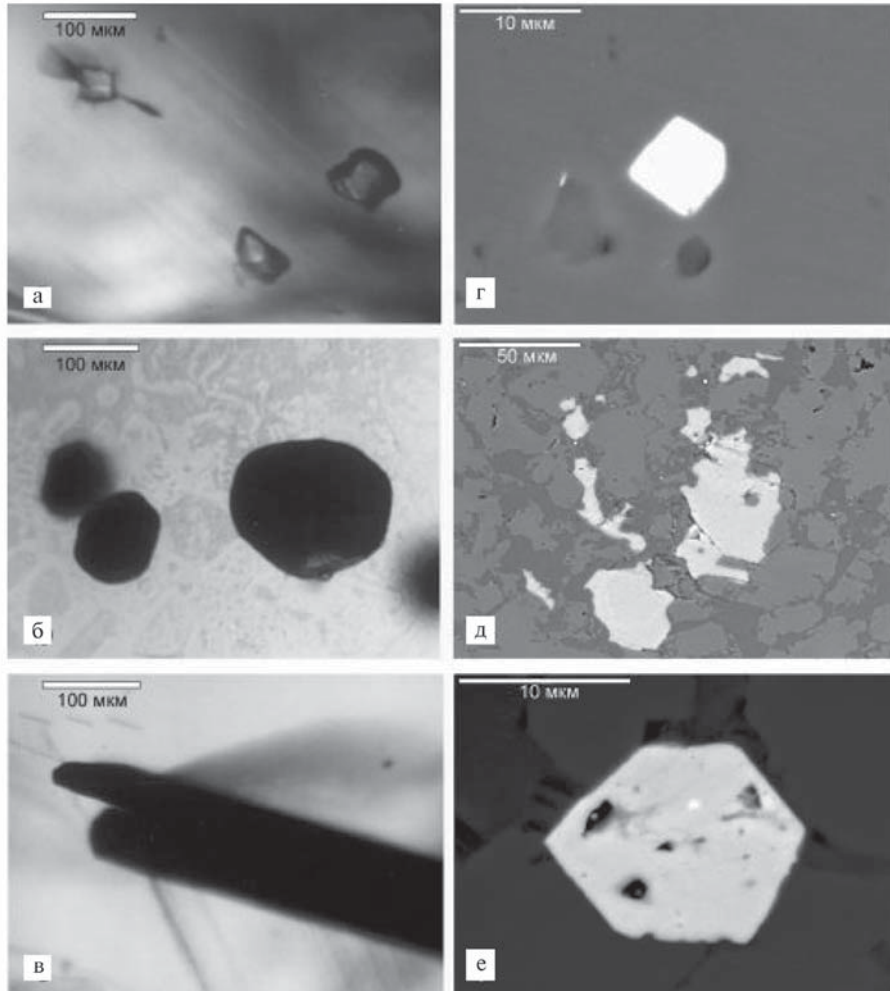


Рис. 4. Сингенетичные минеральные включения в корунде в проходящем свете (а, б, в) и в отраженных электронах (г, д, е): а – альбит, б – цинксо­держающий герцинит, в – колумбит, г – циркон, д – флюорит, е – циркон с включением монацита (белое пятно выше центра кристалла)

ного и зеленоватого (в тонких сколах) цвета размером 40–300 мкм (рис. 4, б; табл. 2). Некоторая часть кристаллов герцинита имеет оторочку из бесцветного корунда шириной не более 10 мкм, что, вероятно, указывает на их протогенетическое происхождение. Колумбит образует таблитчатые, часто удлинённые в направлении совместного роста с корундом-хозяином непрозрачные кристаллы коричневого и черного цвета, их размер варьирует от 70 до 800 мкм (рис. 4, в; табл. 3). Включения бесцветного циркона размером 20–100 мкм имеют призматическую, иногда округлую форму (рис. 4, г, д; табл. 4). Неправильной формы кристаллические агрегаты флюорита размером от 5 до 60 мкм обнаружены с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5300 с энергодисперсионным спектрометром LINK ISIS в темно-синем непрозрачном корунде (рис. 4, е). Выделение монацита неправильной формы размером около 2 мкм (качественный анализ) зафиксировано в цирконе, являющемся включением в синем просвечивающем корунде (рис. 4, е).

*Первичные расплавные* включения в корундах месторождения Незаметного встречаются крайне редко. В основном они располагаются в центральных частях

Таблица 1

## Химический состав включений альбита в корундах, мас. %

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	65,71	0,01	22,01	2,06	10,24	0,94	100,97
2	65,18	0,05	20,62	1,45	10,06	1,65	99,01

Примечание. Анализы, результаты которых отражены в табл. 1–3, выполнены на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-5A к.г.-м.н. В.И.Сапиным в ДВГИ ДВО РАН. Параметры съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ; ток зонда ~ 50 нА; диаметр зонда 5–20 мкм; эталоны – проанализированные химически однородные по составу минералы.

Кристаллохимические формулы: 1. (Na<sub>0,87</sub>K<sub>0,06</sub>)<sub>0,93</sub>Ca<sub>0,1</sub>Al<sub>1,13</sub>Si<sub>2,87</sub>O<sub>8</sub>;  
2. (Na<sub>0,88</sub>K<sub>0,1</sub>)<sub>0,98</sub>Ca<sub>0,07</sub>Al<sub>1,08</sub>Si<sub>2,91</sub>O<sub>8</sub>.

Таблица 2

## Химический состав включений цинксодержащего герцинита в корундах, мас. %

№ п/п	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	ZnO	Сумма
1	0,01	55,09	36,29	1,48	3,16	5,53	101,56
2	0,01	53,07	36,07	1,50	3,16	5,32	99,13
3	0,01	51,01	35,74	1,39	3,04	4,92	96,11

Кристаллохимические формулы: 1. (Fe<sub>0,88</sub>Mn<sub>0,04</sub>Mg<sub>0,14</sub>Zn<sub>0,12</sub>)<sub>1,18</sub>Al<sub>1,88</sub>O<sub>4</sub>;  
2. (Fe<sub>0,90</sub>Mn<sub>0,04</sub>Mg<sub>0,14</sub>Zn<sub>0,12</sub>)<sub>1,2</sub>Al<sub>1,87</sub>O<sub>4</sub>; 3. (Fe<sub>0,93</sub>Mn<sub>0,04</sub>Mg<sub>0,14</sub>Zn<sub>0,11</sub>)<sub>1,22</sub>Al<sub>1,85</sub>O<sub>4</sub>.

Таблица 3

## Химический состав включений колумбита в корундах, мас. %

№ п/п	Расположение точек анализа в зерне	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	TiO <sub>2</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма
1	Центр	16,35	0,31	4,09	1,06	5,75	73,70	101,26
	Край	16,47	0,34	3,91	1,16	6,40	72,97	101,25
2	Центр	15,65	0,86	3,49	2,81	3,22	74,42	100,45
	Край	15,69	1,01	3,36	2,59	3,30	74,43	100,38
3	Центр	16,11	1,26	2,36	4,21	3,32	73,26	100,52

Кристаллохимические формулы: 1. (Fe<sub>0,77</sub>Mg<sub>0,03</sub>Mn<sub>0,2</sub>)<sub>1,0</sub>Ti<sub>0,05</sub>(Ta<sub>0,08</sub>Nb<sub>1,88</sub>)<sub>1,96</sub>O<sub>6</sub>;  
(Fe<sub>0,78</sub>Mg<sub>0,03</sub>Mn<sub>0,19</sub>)<sub>1,0</sub>Ti<sub>0,05</sub>(Ta<sub>0,09</sub>Nb<sub>1,87</sub>)<sub>1,96</sub>O<sub>6</sub>; 2. (Fe<sub>0,73</sub>Mg<sub>0,07</sub>Mn<sub>0,16</sub>)<sub>0,96</sub>Ti<sub>0,12</sub>(Ta<sub>0,05</sub>Nb<sub>1,87</sub>)<sub>1,92</sub>O<sub>6</sub>;  
(Fe<sub>0,74</sub>Mg<sub>0,09</sub>Mn<sub>0,05</sub>)<sub>0,88</sub>Ti<sub>0,11</sub>(Ta<sub>0,05</sub>Nb<sub>1,91</sub>)<sub>1,96</sub>O<sub>6</sub>; 3. (Fe<sub>0,75</sub>Mg<sub>0,1</sub>Mn<sub>0,11</sub>)<sub>0,96</sub>Ti<sub>0,17</sub>(Ta<sub>0,06</sub>Nb<sub>1,82</sub>)<sub>1,88</sub>O<sub>6</sub>.

Таблица 4

## Химический состав включений циркона в корундах, мас. %

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>	Сумма
1	31,41	2,89	0,13	-	61,38	3,05	98,86
2	31,40	1,80	0,16	0,16	61,61	2,74	97,87
3	32,97	0,73	-	-	67,10	2,10	102,90
4	32,87	-	-	-	63,25	3,63	99,75

Примечание. Прочерк – содержание ниже предела обнаружения. Анализы выполнены на электронном микроскопе JSM-5300 с EDS-системой LINK ISIS ст.н.с. М.И.Лапиной в лаборатории кристаллохимии ИГЕМ РАН. Параметры съемки: ускоряющее напряжение 25 кВ, ток зонда 50 нА, диаметр зонда 4–10 мкм, градуировка зонда с помощью химически чистого металлического кобальта, время счета 100 с. Для количественного расчета концентраций элементов использовалась встроенная поправочная программа ZAF-коррекции LINK EDS.

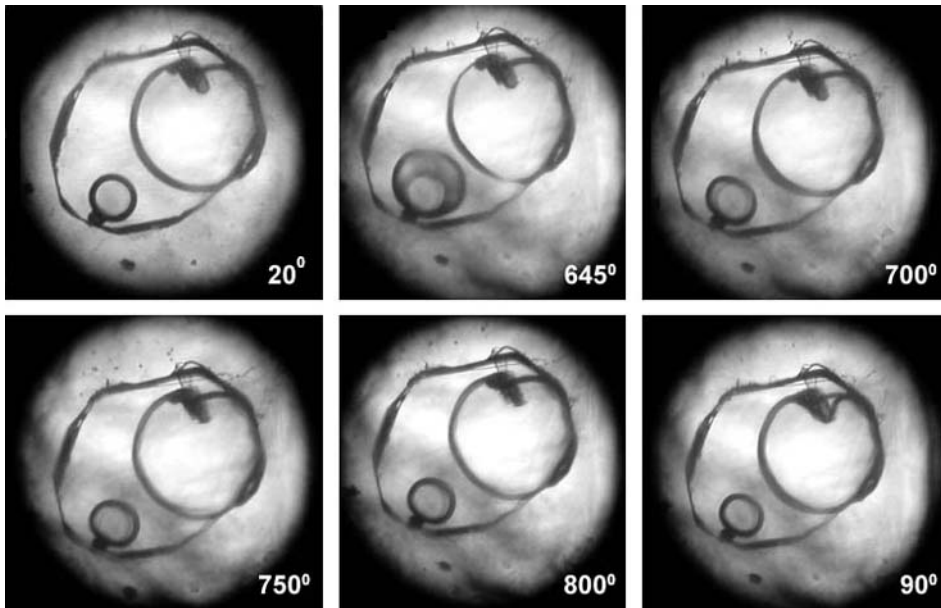


Рис. 5. Поведение первичного расплавленного включения в корунде в процессе термометрического эксперимента. Последнее фото сделано при охлаждении

кристаллов согласно зонам роста последних. Чаще всего включения этого типа имеют овальную, иногда уплощенную, редко изометричную форму. Они состоят из прозрачного стекла и газового пузырька, иногда содержат одну или несколько минеральных фаз (рис. 5 и 6). Среди минеральных фаз, присутствующих в первичных расплавленных включениях, нами диагностирован биотит (табл. 5). В большинстве

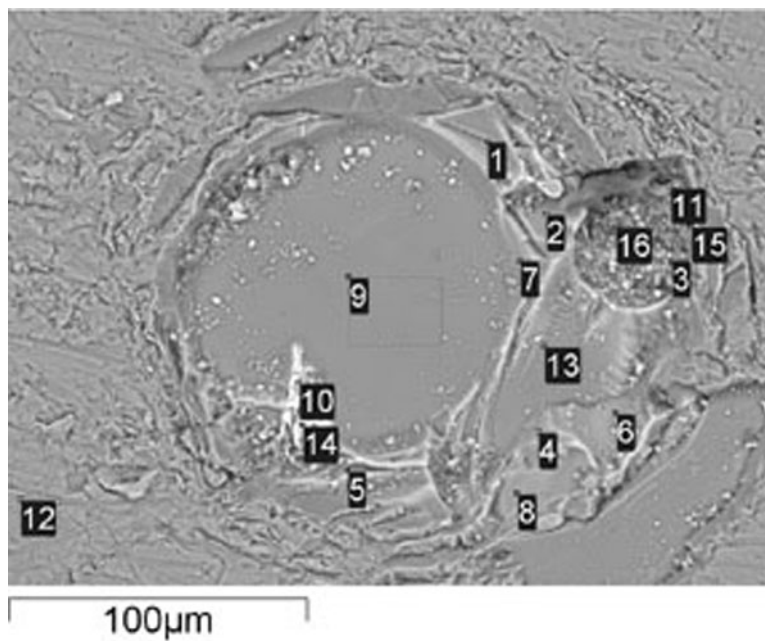


Рис. 6. Вскрытое расплавленное включение в корунде после прогрева до температуры 800 °C (номера точек соответствуют номерам анализов в табл. 5)



Таблица 5

## Химический состав биотита и стекла в прогретом первичном расплавленном включении в корунде, мас. %

№ п/п	Фаза	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	SO <sub>3</sub>	Сумма
1	Gl	64,56	-	19,65	1,04	-	-	-	6,18	-	7,06	0,92	0,58	-	100
2	Gl	63,38	-	20,22	0,65	-	-	-	8,00	0,32	5,79	1,15	0,49	-	100
3	Gl	64,83	-	14,49	0,38	2,67	-	-	11,03	3,72	2,18	-	0,18	0,51	100
4	Gl	63,79	-	20,34	0,57	-	-	-	7,70	-	5,98	0,97	0,66	-	100
5	Gl	64,50	-	18,57	0,86	0,36	-	-	7,47	0,75	6,04	0,94	0,50	-	100
6	Gl	62,74	-	20,54	0,58	-	-	-	8,03	0,59	5,80	1,13	0,58	-	100
7	Gl	63,40	-	20,84	0,73	-	-	-	7,23	-	6,01	1,28	0,51	-	100
8	Gl	64,13	-	19,94	0,70	-	-	-	7,46	-	6,11	1,09	0,56	-	100
9	Cor	0,71	-	97,57	1,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
10	Bt <sub>1</sub>	40,94	2,61	15,81	22,60	4,44	0,43	-	3,58	0,84	7,97	-	0,78	-	100
11	Gl	68,91	-	9,04	0,39	3,46	-	-	9,80	7,30	0,58	-	-	0,51	100
12	Cor	-	-	98,34	1,25	-	-	-	-	-	-	0,40	-	-	100
13	Cor	2,14	-	96,21	1,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
14	Bt <sub>1</sub>	35,46	2,38	19,29	27,06	4,68	0,67	-	0,73	-	8,89	-	0,84	-	100
15	Bt <sub>2</sub> +Gl	53,15	3,12	11,20	11,57	3,82	0,23	0,86	9,97	2,98	2,85	-	0,25	-	100
16	Gl	63,56	-	17,14	1,12	2,60	-	-	8,06	6,87	0,65	-	-	-	100

Примечание. Анализы приведены к 100 мас.%, прочерк – содержание ниже предела обнаружения, Gl – стекло, Cor – корунд, Bt – биотит. Анализы выполнены к.г.-м.н. Н.С.Кармановым на электронном сканирующем микроскопе LEO 1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCAEnergy в лаборатории физических методов анализа ГИН СО РАН. Параметры съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 60 нА, диаметр зонда 5–10 мкм.

случаев объем газового пузырька (пузырьков) составляет 30–35 %, иногда 20–25 % от объема вакуоли. Границы вакуолей с минералом-хозяином тонкие, прерывистые, часто неровные. Размер первичных расплавных включений варьирует от 1–2 до 200–300 мкм, преобладают включения размером 20–50 мкм.

**Термометрические эксперименты с расплавными включениями.** Метод гомогенизации включений – основной и наиболее точный метод определения температур образования минералов. Он основан на измерении температур гомогенизации содержимого включений, при этом температура гомогенизации отождествляется с температурой расплава в момент захвата его растущим кристаллом. Максимальные температуры, фиксируемые этим методом, отражают температуру расплава на ранних стадиях роста вкрапленников [2].

Для термометрических опытов отбирались наиболее типичные расплавные включения (РВ) размером не более 15 мкм, представительность которых гарантировалась предварительным изучением фазового состава. Термометрические исследования РВ в корундах проводились в муфельной термокамере, сконструированной в лаборатории И. Д. Рябчикова (ИГЕМ РАН), методом закалки. Суть этого метода заключается в нагревании препарата до заданной температуры и последующем быстром охлаждении (закалка) в воздушной среде. Перед использованием термопара была отградуирована по точке плавления золота (1063 °С). С целью достижения равновесных условий плавления РВ нагревание включений проводилось с 1,5–3-часовыми выдержками в изотермических условиях через каждые 30 °С после начала плавления. Такой режим нагревания позволяет определить температуру фазовых превращений, в том числе и температуру гомогенизации ( $T_{\text{гом}}$ ) отдельных РВ, как среднюю точку интервала между соответствующими изотермическими выдержками, обычно с точностью  $\pm 15$  °С. Общая длительность каждого опыта составляла в среднем 10–12 ч.

Поведение фаз при нагревании первичного расплавного включения (ПРВ) размером около 200 мкм проиллюстрировано на рис. 5, нагрев осуществлялся до 800 °С. Интересно отметить, что в интервале температур 645–672 °С происходит резкое увеличение объема нижнего газового пузырька, но уже при достижении 700 °С его объем близок к первоначальному; искажается только форма пузырька, он становится овальным. Подплавление минеральных фаз происходит в диапазоне 750–800 °С, но при остывании они приобретают прежние кристаллографические очертания. Пока нам не удалось гомогенизировать ни одного ПРВ, хотя в ряде термометрических экспериментов нагрев осуществлялся до температуры 1400 °С (давление атмосферное). Мы объясняем эти особенности поведения включений высокими давлениями (порядка 2–4 кбар), существовавшими в момент консервации РВ. Для более обоснованного суждения об этом необходимо провести эксперименты с нагреванием ПРВ в газовом аппарате высокого давления, что нам пока технически недоступно.

Исходя из данных табл. 5, стекло в прогретом первичном расплавном включении состоит преимущественно из  $\text{SiO}_2$  (62,74–68,91 мас.%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (9,04–20,84 мас.%), щелочей с тенденцией преобладания  $\text{Na}_2\text{O}$  (6,18–11,03 мас.%) над  $\text{K}_2\text{O}$  (0,58–7,06 мас.%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,38–1,12 мас.%) наряду с летучими  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,92–1,28 мас.%) и  $\text{Cl}$  (0,18–0,66 мас.%). Вычисленный для стекол этого включения коэффициент агпаитности варьирует в пределах 0,81–1,74, в большинстве случаев он близок к 0,9. Особенности химического состава и величина коэффициента агпаитности свидетельствуют о том,

что, вероятно, кристаллизация корунда происходила из граносиенитовых расплавов. На присутствие воды в этих расплавах указывает наличие в ПРВ кристаллов биотита.

Альтернативная гипотеза, постулирующая происхождение корундов из щелочных базальтов, принимавшаяся нами в качестве рабочей в начальный период исследований, несмотря на несомненную привлекательность, оказалась в явном противоречии с геологическими и петрогенетическими фактами. Прежде всего, обращает на себя внимание совпадение ареала распространения россыпи с полями проявления гранитоидов на площади месторождения. Видимо, также не случайна совместная концентрация золота, генетически связанного с гранитоидным штоком, и камнесамоцветов в приплотиковой части аллювиальных отложений при отсутствии корундов в незолотоносных россыпях района. Большое количество исследований, направленных на обнаружение корундов в шлифах, пластинах и протолочках щелочных базальтов, не дали ни одного положительного результата, тогда как акцессорный корунд зафиксирован в шлифах и протолочках граносиенит-порфиров, мусковитизированных гранитов и грейзенизированных гранит-порфиров. Минеральный парагенезис включений в незаметнинских корундах (рутил, альбит, цинксоодержащий герцинит, колумбит, циркон, флюорит и монацит) соответствует гранитоидному парагенезису стадии метасоматических преобразований, при этом среди минеральных включений в корундах минералы базальтового парагенезиса не обнаружены. Кроме того, он ни в коей мере не противоречит парагенезису, наблюдаемому на других корундосодержащих объектах, где корунд установлен в материнских породах. В качестве примера такой минеральной ассоциации можно привести сиенит-пегматиты копи 298 Ильменского заповедника [3], где корунд ассоциирует с олигоклазом, биотитом, мусковитом, цирконом (гиацинтом), монацитом, колумбитом и другими минералами.

Таким образом, геологическая ситуация Незаметнинского месторождения, минеральный парагенезис корунда и состав фаз первичного расплавленного включения подтверждают выдвинутые нами ранее [5, 6, 9, 12] предположения о генетической связи корунда из россыпи с телами мезозойских гранитоидов, которые широко проявлены на данной площади.

Кристаллизация корунда происходила из бедных кремнеземом и обогащенных глиноземом, а также летучими (фосфор, хлор и вода) граносиенитовых расплавов. При этом остается пока нерешенным вопрос о физико-химических параметрах среды, формировавшей корунд. Мы предполагаем, что безуспешные попытки гомогенизировать первичные расплавленные включения при атмосферном давлении обусловлены высоким давлением (2–4 кбар), существовавшим в момент их консервации. По-видимому, этот процесс близок к изученному В.И.Коваленко [4] для кристаллов топаза из пегматитов Волыни, где им получены следующие физико-химические параметры: температура 650–700 °С, флюидное давление 2,6–3,0 кбар. В любом случае, чтобы подтвердить или опровергнуть этот тезис, необходимо провести серию термометрических экспериментов в газовом аппарате высокого давления.

Авторы глубоко признательны М.И.Лапиной (ИГЕМ РАН), Н.С.Карманову (ГИН СО РАН) за неоценимую возможность исследования минеральных и расплавленных включений в корундах на современном аналитическом оборудовании, а также В.Б.Тишкиной (ДВГИ ДВО РАН) за помощь в оформлении статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев А.С., Ананьева Т.А., Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П. Благородные корунды и цирконы из россыпей Приморья // Зап. ВМО. 1998. № 4. С. 120–125.
2. Доломанова Е.И., Борисовский С.Е., Боярская Р.В., Цепен А.И. Физические методы исследования включений минералообразующей среды в минералах // Методы и аппаратура для исследования включений минералообразующих сред. М.: Наука, 1980. С. 135–155.
3. Жданов В.Ф., Поляков В.О., Нишанбаев Т.П. Минералогия жилы корундового пегматита копи 298 Ильменского заповедника // Материалы к минералогии Южного Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1978. С. 92–97. (Тр. Ильменского гос. заповедника; Вып. 21).
4. Коваленко В.И., Царева Г.М., Наумов В.Б. и др. Магма пегматитов Вольни: состав и параметры кристаллизации по данным изучения включений минералообразующих сред // Петрология. 1996. Т. 4, № 3. С. 295–309.
5. Одариченко Э.Г. Включения в корундах месторождения Незаметное (Приморский край) // Тр. IX Междунар. конф. по термобарогеохимии. М.: ВНИИСИМС, 2001. С. 97–111.
6. Одариченко Э.Г., Лапина М.И. Генетические аспекты корундовой минерализации (россыпное месторождение Незаметное, Приморский край) // Новые идеи и концепции в минералогии: Материалы III Междунар. минерал. семинара (19–21 июня 2002 г.). Сыктывкар: Геопринт, 2002. С. 213–215.
7. Пизнор А.В. Основы термобарогеохимии. Львов: Вища шк., 1986. 200 с.
8. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. Т. 1. М.: Мир, 1987. 560 с.
9. Ханчук А.И., Залищак Б.Л., Пахомова В.А., Одариченко Э.Г., Сапин В.И. Генезис и геммология сапфиров месторождения Незаметное (Приморский край) // Тихоокеан. геология. 2002. № 1. С. 89–95.
10. Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д. и др. Геология и полезные ископаемые Приморского края: Очерк. Владивосток: Дальнаука, 1995. 68 с.
11. Хисина Н.Р., Сенин В.Г., Петушкова Л.В., Поляков В.О. О природе ориентированных выделений ильменита в ильменорутите и корунде // Геохимия. 1990. № 9. С. 1352–1359.
12. Khanchuk A., Zalishchak B., Pakhomova V., Odarichenko E., Sapin V. Genesis and gemmology of sapphire from the Nezametnoye deposit, Primorye Region, Russia // Austr. Gemmologist. 2003. Vol. 21. P. 329–335.
13. Saminpanya S. Ti-Fe mineral inclusions in star sapphires from Thailand // Austr. Gemmologist. 2001. Vol. 21. P. 125–128.