

О происхождении циркона из плагиогнейсов архейского комплекса Кольской сверхглубокой скважины (термобарогеохимические данные)

В.П. Чупин¹, Г.А. Сорокина¹, В.Р. Ветрин²

¹ Институт минералогии и петрографии СО РАН, Новосибирск

² Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация. Изучены включения в цирконе магматического и метаморфического генезиса из биотит-плагиоклазовых гнейсов восьмой толщи разреза архейского комплекса Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). Критерием генезиса магматических цирконов является наличие в них расплавных включений, исследование которых позволяет определить состав и эволюцию исходных расплавов. Изучение состава включений показало, что кристаллизация плагиориодацитовых расплавов начиналась с образования микрозерен калийсодержащего плагиоклаза (Ab_{61} , An_{26} , Or_{13}) и титаномагнетита. На этом же этапе были образованы, вероятно, зерна циркона, некоторые из которых захватывали включения жидкого CO_2 и сингенетичные расплавные включения. Наличие таких включений указывает на кристаллизацию ранних цирконов из насыщенных CO_2 магм при давлении отделяющихся флюидов около 3,5 кбар. При метаморфизме протолитов плагиогнейсов были образованы сложноограниченные изометричные кристаллы циркона, содержащие первичные включения хлоридных растворов, аналогичные первичным включениям хлоридных растворов в плагиоклазе и кварце из плагиогнейсов. Давление флюида, оцененное по включениям водных растворов и богатых CO_2 включениям в рассматриваемых цирконах, достигало 2,8-4,0 кбар при $T = 540-620^\circ C$.

Abstract. Inclusions in zircon of magmatic and metamorphic genesis from biotite-plagioclase gneiss in SG-3 Archaean unit VIII have been studied. A criterion of magmatic zircon genesis is the presence of melted inclusions in them, the study of which allows determining the composition and evolution of the primary melts. The study of the inclusion composition showed that crystallization of plagioryhodacitic melts started with formation of micro grains of potassium-bearing plagioclase (Ab_{61} , An_{26} , and Or_{13}) and titanomagnetite. At the same stage zircon grains were likely to be formed. Some of them trapped liquid CO_2 inclusions and syngenetic melted inclusions. The presence of such inclusions points to crystallization of early zircon from CO_2 -saturated magmas at $P \sim 3.5$ kbar. During metamorphism of plagiogneiss protoliths, isometric crystals of zircon cut in a complicated manner were formed. They contained primary inclusions of chloride solutions similar to those in plagioclase and quartz from plagiogneiss. The fluid pressure, assessed by inclusions of water solutions and CO_2 rich inclusions in the zircons under study, reached 2.8-4.0 kbar at $T = 540-620^\circ C$.

1. Введение

В работе приведены первые результаты исследований включений в акцессорном цирконе и в пороодообразующих минералах из биотит-плагиоклазовых гнейсов восьмой толщи разреза архейского комплекса Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), расположенной в интервале глубин 10601-11411 м. Преобладающим типом пород этой части разреза являются биотитовые, реже амфибол-биотитовые плагиогнейсы (~66 %) и амфиболиты (~23 %) с прослоями железистых кварцитов. Протолитами плагиогнейсов были эффузивные породы риолит-дацитового состава с возрастом 2832 млн лет, метаморфизованные около 2740 млн лет назад (*Кольская сверхглубокая...*, 1998). Для петрологической интерпретации U-Pb датировок циркона из этих гнейсов большое значение имеет реконструкция процессов образования этого минерала. Прямую информацию о генезисе циркона дает изучение расплавных и флюидных включений, в ряде случаев позволяющее выделить реликтово-магматический (дометаморфический) циркон, а также определить состав и особенности кристаллизации магм, из которых образовались протолиты гнейсов (Чупин и др., 1994; Chupin et al., 1998).

2. Результаты изучения кристаллов циркона и их включений

Изучены цирконы из биотитовых плагиогнейсов обр. 26, 39861, 40302 с глубин, соответственно, 10780, 10870 и 11125 м. Зерна циркона были исследованы в монофракции этого минерала (обр. 26), а также в полированных пластинках плагиогнейсов из обр. 39861 и 40302.

Плагиогнейсы обр. 26 образованы олигоклазом (20-25 % An, содержание 55-60 %), кварцем (25-30 %), микроклином (5 %), зеленовато-бурым биотитом (6 %), акцессорными минералами (3 %) – апатитом, цирконом, магнетитом, эпидотом, алланитом, карбонатом. Структура гранобластовая,

бластогранитовая, с отчетливо выраженным идиоморфизмом зерен плагиоклаза по отношению к кварцу и микроклину. В табл. 1 приведены результаты химического анализа вмещающих цирконы пород, имеющих плагиориодацитовый (обр. 26 и 39861) и дацитовый (обр. 40302) составы, а также стекло прогретых расплавных включений в цирконе из биотитового плагиогнейса (обр. 26).

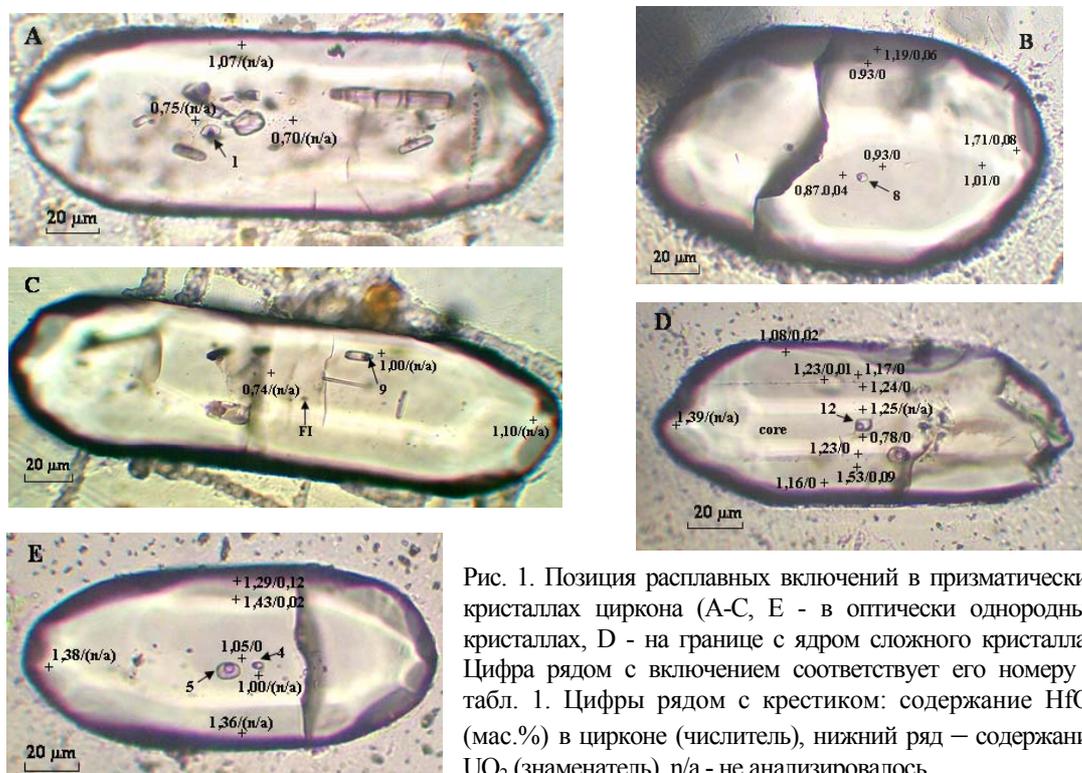


Рис. 1. Позиция расплавных включений в призматических кристаллах циркона (А-С, Е - в оптически однородных кристаллах, D - на границе с ядром сложного кристалла). Цифра рядом с включением соответствует его номеру в табл. 1. Цифры рядом с крестиком: содержание HfO₂ (мас.%) в цирконе (числитель), нижний ряд – содержание UO₂ (знаменатель), n/a - не анализировалось

Таблица 1. Химический состав (мас. %) пород и стекло прогретых расплавных включений в цирконе из биотитового плагиогнейса (обр. № 26) из разреза Кольской сверхглубокой скважины

№№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	F	Сумма	*HfO ₂	**	AR	K ₁	K ₂
1	68,64	0,32	13,17	4,01	0,76	4,19	3,22	2,66	0,07	0,09	97,13	0,75	C	2,6	0,83	0,84
2	70,57	0,35	10,97	3,94	0,72	4,59	3,22	3,68	0,09	0,05	98,13	0,70	C	2,6	1,14	0,62
3	69,17	0,23	12,99	5,07	1,21	1,06	2,91	4,17	0	0,08	96,81	0,90	O	2,6	1,43	1,16
4	72,64	0,07	14,58	0,12	0,03	1,39	4,89	2,46	0		96,18	1,00	C-I	2,4	0,50	1,10
5	74,92	0,05	12,05	0	0	0,63	3,67	2,93	0		94,25	1,05	I	2,4	0,80	1,17
6	72,81	0,17	13,68	0,1	0,02	1,84	5,12	2,28	0,01		96,03	1,00	I	3,0	0,45	0,96
7	73,39	0,10	14,04	0,29	0,08	1,48	4,74	1,71	0		95,83	0,84	C	2,6	0,36	1,14
8	74,59	0	13,74	0,55	0	1,85	3,83	1,02	0		95,58	0,87	I	1,8	0,27	1,27
9	72,03	0,02	15,53	0,14	0,01	1,23	3,43	3,37	0	0	95,76	1,00	O	3,5	0,98	1,35
10	75,18	0	12,73	0,24	0	1,56	3,32	2,78	0		95,81	1,15	C	2,8	0,84	1,13
11	77,07	0,03	8,98	0,01	0,02	0,73	2,85	2,72	0		92,41	0,96	I	2,5	0,95	1,00
12	73,31	0	13,77	0,19	0	1,55	2,69	3,77	0	0	95,28	1,25	C	2,7	1,40	1,22
13	73,33	0,27	14,95	2,17	0	1,11	0,69	2,92	0		95,44	1,21	O	2,2	4,23	2,80
14	76,79	0,07	14,25	0,22	0,09	0,27	1,98	4,14	0,01	0	97,82	1,08	O	2,0	2,10	1,73
15	71,20	0,29	15,17	2,27	0,67	2,81	5,26	1,38				-	-	-	0,26	1,00
16	69,92	0,30	15,79	2,68	0,46	2,99	4,89	1,41				-	-	-	0,29	1,05
17	66,9	0,42	18,65	2,65	1,17	4,11	4,98	1,35				-	-	-	0,27	1,09

Примечание: анализы включений (1-14) и определения содержания HfO₂ в цирконе выполнены на микрозонде "Camebax micro" в ОИГТМ СО РАН (аналитик Л.Н. Поспелова); анализы пород (15-17) – в Геологическом институте КНЦ РАН (15 – обр. 26, 16 – обр. 39861, 17 – обр. 40302). Пустая клетка – компонент не определялся, прочерк – не обнаружен. * – содержание HfO₂ в цирконе рядом с включением. ** – позиция включений в зернах: С – центральная часть, I – промежуточная, O – крайняя; AR – коэффициент удлинения кристалла. Анализы (1-3) и (4, 5) – из двух индивидуальных кристаллов. Содержания Na₂O в таблице увеличены на 30 %, чтобы компенсировать его потерю при анализе. K₁ = K₂O/Na₂O; K₂ = A/CNK = mol Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O).

Кристаллы циркона прозрачные, бесцветные, редко буроватые, слабо трещиноватые. Они включены преимущественно в зерна кварца, реже – в кристаллы плагиоклаза, апатита, а также располагаются на границе зерен этих минералов. Среди кристаллов можно выделить два морфологических типа. Преобладают субидиоморфные призматические кристаллы с коэффициентом удлинения (K_y) 1,5-3,5 (рис. 1А-Е); реже встречаются изометричные зерна с большим количеством мелких граней (рис. 2). В призматических кристаллах с K_y меньше 3,5 хорошо развиты острые и тупые дипирамиды, тогда как в сильно удлиненных кристаллах острые дипирамиды развиты значительно слабее. Часто встречаются асимметричные кристаллы, что указывает на кристаллизацию циркона в присутствии близко расположенных зерен других минералов. Призматические кристаллы иногда имеют слегка округленные грани; обычно они однородные, в некоторых зернах проявлена слабая зональность

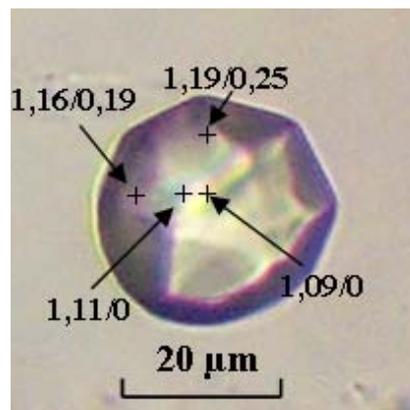


Рис. 2. Сложноограненный изометричный кристалл циркона

вблизи вершин. Редко встречаются сложные призматические кристаллы с однородными внутренними индивидуумами ("ядрами"), которые оптически можно отличить от циркона внешней части только по наличию мельчайших включений (размером до 1 мкм) вдоль границы ядра и внешней части кристалла (рис. 1D). Вершины (иногда и грани призм) ядер кристаллов сильно растворены. Они имеют удлиненно-призматический сильно уплощенный облик и занимают до 2/3 длины всего кристалла. Поперечные трещинки во внешней части этих кристаллов обрываются на границе с ядром. Эти ядра, возможно, являются реликтовыми зернами ранней генерации первично магматического (протолитового) циркона.

Микрозондовыми анализами установлено систематическое увеличение концентрации HfO_2 от 0,7 мас.% в центральной части зерен циркона до 1,4 мас.% (иногда до 1,7 мас.%) в их внешних частях. Эта геохимическая особенность позволяет оценить относительное время захвата различных включений в призматических оптически однородных кристаллах циркона. Анализы двух сложных кристаллов показали, что циркон оболочек (вблизи границы внутренних ядер) содержит 1,15-1,25 мас.% HfO_2 , а в более позднем цирконе (рис. 1D) концентрация HfO_2 достигает 1,53 мас.% и затем уменьшается к краю кристалла. Отношение $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ в некоторых кристаллах изменяется в широком интервале (например, в кристаллах рис. 1А и 1С от 96 в центральной части зерен до 62 в их внешних частях), что считается показателем быстрой кристаллизации циркона.

Призматические зерна циркона содержат различные микрокристаллики (вероятно, фенокристы) и их сростки, а также расплавные включения и очень редко первичные флюидные включения. С помощью оптической микроскопии и микрозондовых анализов среди микрокристалликов определены кварц, плагиоклазы (от альбита до олигоклаза с содержанием K_2O до 2,1 мас.%), К-Na полевой шпат (во внешних частях зерен), биотит, титаномагнетит и фторапатит, представленный коротко- и длиннопризматическими кристаллами. В короткопризматических и длиннопризматических кристаллах апатита содержится, 1,6-2,4 и 3,4-3,8 мас.% фтора соответственно. Концентрация хлора в кристаллах обоих типов не превышает 0,1 мас.%.

Кристаллы призматического циркона вмещают одиночные расплавные включения или группы из нескольких таких включений, азонально распределенных внутри кристаллов (рис. 1А-Е). Такие включения считаются первичными (Базарова и др., 1975; Ермаков, Долгов, 1979; Roedder, 1984). Расплавные включения встречаются в оптически однородных зернах, а также в оболочках (на границе с ядром) сложных кристаллов (рис. 1D). Расплавные включения не обнаружены во внешних частях сложных кристаллов, а также во внешних частях (с содержанием $\text{HfO}_2 > 1,25$ мас.%) оптически однородных зерен. Включения имеют изометричную или призматическую форму, иногда сильно удлинены вдоль длинной оси кристалла (рис. 1С), и имеют размер от 2 до 6 мкм, редко до 14 мкм вдоль длинной оси. Вокруг включений иногда можно наблюдать рекристаллизацию вмещающего циркона. Включения содержат тонкораскристаллизованный силикатный агрегат и интерстициальную флюидную фазу. Самые мелкие включения (размером до 2-3 мкм) состоят из оптически однородной фазы (возможно, стекла), которую из-за малых размеров не удалось диагностировать. Расплавные включения иногда содержат случайно захваченные агрегаты микрокристаллов (кварц + апатит + рудный минерал + плагиоклаз). Такие включения классифицируются как аномальные (Базарова и др., 1975).

Расплавные включения нагревали до 1050°C при атмосферном давлении. Дочерние кристаллические фазы обычно плавилась в интервале температур 950-1000°C с обособлением газового пузырька. В азональной группе однородных включений (размером 1-3 мкм) в длиннопризматическом цирконе из обр. 39861 при температуре около 950°C во всех включениях появились флюидные пузырьки.

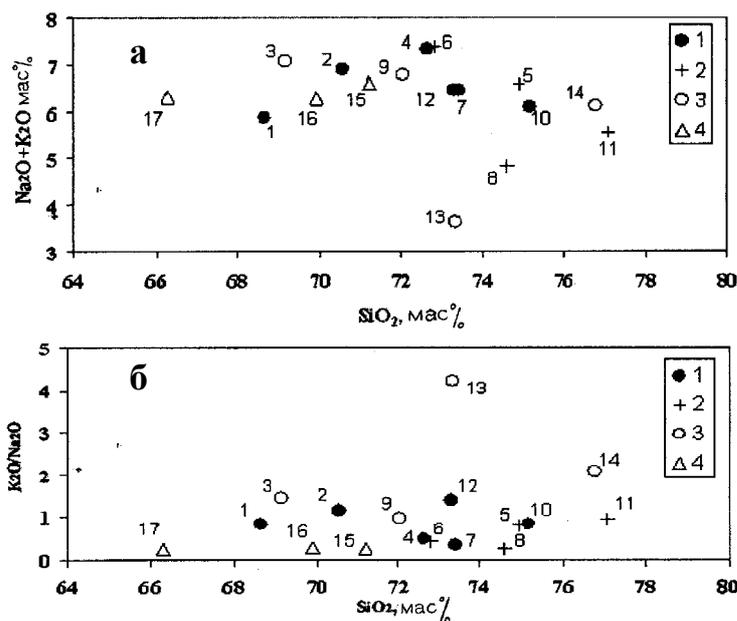


Рис. 3. Диаграммы $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$, $SiO_2 - K_2O/Na_2O$ для расплавных включений в цирконе.

1-3 – включения, соответственно, из центральных, промежуточных и краевых частей кристаллов; 4 – составы пород. Цифры соответствуют номерам включений (1-14) и пород (15-17) в табл. 1.

Такие фазовые изменения характерны для стекловатых включений. Появление пузырьков при нагреве однофазовых стекловатых включений наблюдалось во многих минералах эффузивных пород (Базарова и др., 1975). Полная гомогенизация (растворение газового пузырька в расплаве) не достигалась даже при 1200°C в самых маленьких включениях в изученных кристаллах циркона. Расплавные включения в архейских цирконах из других регионов также не гомогенизировались (Чупин и др., 1993; 1994; Chupin et al., 1998). Это может быть связано с частичной потерей летучих из включений, особенно воды относительно CO_2 , при метамиктизации (аморфизации) и/или перекристаллизации циркона вокруг включений. При экспериментальном изучении показано, что циркон (особенно метамиктный) легко перекристаллизуется под воздействием углекислотно-водно-хлоридных флюидов при температуре 600-800°C и давлении более 1 кбар (Ризванова и др., 1996).

Присутствие фенокритов (или ксенокритов) в некоторых расплавных включениях делает их изучение более трудным. Случайные кристаллические фазы в комбинированных включениях не плавятся даже при 1150°C. Высокое содержание FeO во включении 3 (табл. 1, рис. 3) можно объяснить присутствием нерастворенной, случайной, непрозрачной, высокожелезистой фазы.

Стекла закаленных расплавных включений в цирконе имеют кислые и ультракислые составы с содержанием кремнезема в 68,6-77,1 мас.%. Сумма щелочей в преобладающем количестве включений колеблется в пределах 5,9-7,4 мас.%, а соотношение K_2O/Na_2O (K_1) – в диапазоне от 0,27 до 1,14. Часть включений (3, 12, 13, 14) имеет более высокие значения K_1 (1,40-4,23), связанные прямой корреляционной зависимостью с глиноземистостью пород (K_2). Концентрации TiO_2 и MgO составляют 0-0,35 и 0-1,2 мас.%, содержания FeO и CaO варьируют в пределах 0-5,1 и 0,3-4,6 мас.%, соответственно. Содержание фтора и хлора во включениях не превышает 0,09 мас.%. На классификационной диаграмме Ab-An-Or (Barker, 1979) включения из центральных частей кристаллов имеют, главным образом, состав трондьемита и гранодиорита, тогда как расплавные включения из периферических и краевых частей зерен циркона по составу соответствуют гранитам или кварцевым монцонитам (рис. 4а).

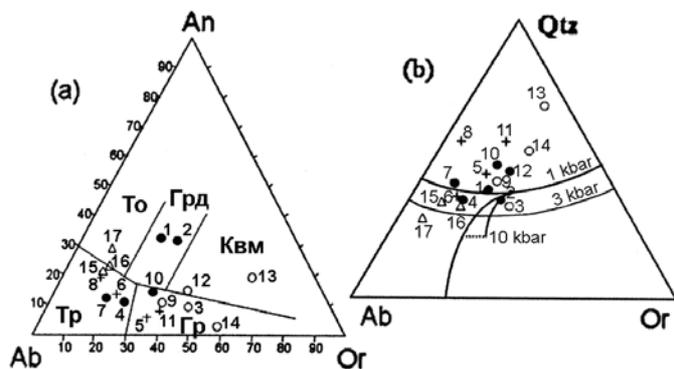


Рис. 4. Нормативные составы расплавных включений в цирконе на диаграммах: (а) альбит (Ab) – анортит (An) – ортоклаз (Or), (б) альбит (Ab) – ортоклаз (Or) – кварц (Qtz). Условные знаки включений и пород такие же, как на рис. 3. На рис. 4, а поля тоналитов (То), трондьемитов (Тр), гранодиоритов (Грд) и гранитов (Гр) даны по (Barker, 1979), Квм - кварцевый монцонит. На рис. 4б приведены котектические линии при $P(H_2O) = 1$ и 3 кбар и состав эвтектик при а $(H_2O) = 1$ (слева) и при а $(H_2O) = 0,5$ (Inger, Harris, 1993).

Проанализированы расплавные включения в двух кристаллах (в первом – с включениями 1-3 и во втором – 4, 5). Включения 1, 2 и 4 расположены ближе к центру кристалла, а 3 и 5 – ближе к краю, что позволило выявить эволюцию первичных расплавов при кристаллизации оптически гомогенного циркона. Включение 1 в центральной части кристалла (с содержанием $\text{HfO}_2 = 0,75$ мас.%) имеет состав плагиориодацита, тогда как стекло включения 2 – низкощелочной риодацитовый состав с более высоким содержанием K_2O (рис. 3а). Состав включения 3 в периферической части этого же кристалла соответствует риодациту с более низким содержанием CaO , более высокими концентрациями FeO , MgO и повышенным значением отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ по сравнению с включениями из центральной части кристалла (рис. 3б). Включение 1 отличается от валового состава породы (обр. 26) повышенной величиной отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, более высокими концентрациями CaO и FeO , а также более низким значением коэффициента глиноземистости K_2 . Стекла включений 4, 6, 7 и 8 в центральной и промежуточных частях других зерен циркона (с содержанием $\text{HfO}_2 < 1,0$ мас.%) по сравнению с включением 1 имеют существенно натриевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 0,5$) риодацитовые и плагиориолитовые составы с низкими концентрациями FeO , MgO и CaO .

Во включениях 5, 9, 11, 13 и 14, расположенных ближе к периферии однородных кристаллов, отмечается увеличение отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ и содержания SiO_2 по сравнению с включениями в центральных частях (табл. 1 и рис. 3б). Низкощелочные риолитовые составы (с отношением $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ от 0,84 до 1,40) установлены для включений 10 и 12, расположенных в оболочке (на границе с ядром) сложных призматических кристаллов.

В центральных частях оптически однородных призматических кристаллов циркона (с $K_2 < 3,5$) редко встречаются одиночные флюидные включения, сингенетичные с расплавными включениями (рис. 1С). Флюидные включения мелкие (до 4 мкм), частично ограненные. При комнатной температуре они состоят из жидкого CO_2 и газового пузырька (+ мелкий недиагностированный силикатный кристаллик). По характеру распределения такие включения считаются первичными (Ермаков, Долгов, 1979; Roedder, 1984). Один короткопризматический кристалл циркона вмещает треснувшее длиннопризматическое зерно апатита, между обособленными частями которого находится флюидное включение жидкого CO_2 с газовым пузырьком. Флюидные включения гомогенизируются в жидкую фазу при температуре около 24°C , что соответствует плотности $0,73$ г/см³ (Варгафтик, 1972). По данным замораживания, включения наполнены чистым CO_2 .

В короткопризматическом кристалле циркона из обр. 39861 найдено первичное комбинированное включение, которое состоит из гетерогенного флюидного пузырька и нескольких силикатных кристалликов. Флюидный пузырек занимает около 1/3 объема включения. По данным замораживания, пузырек состоит из жидкого CO_2 (плотностью $\sim 0,71$ г/см³) и каемки малоконцентрированного водного раствора NaCl .

В изометричных, сложноограненных зернах циркона (рис. 2) не обнаружены расплавные включения. В центральной части одного такого кристалла (размером в 20 мкм) из зерна плагиоклаза (обр. 39861) было найдено первичное водное включение с газовым пузырьком и недиагностированной кристаллической фазой. Включение имеет изометричную, хорошо ограненную форму (размером около 3 мкм). Пузырек занимает 5-10 % от объема включения. В плагиоклазе (рядом с зерном циркона) содержится первичное флюидное включение с таким же соотношением фаз. Эти включения аналогичны первичным метаморфическим включениям хлоридных растворов в кварце из вмещающего гнейса. Подобные растворы захватывались как вторичные включения и в некоторых призматических кристаллах циркона.

3. Результаты изучения включений в породообразующих минералах

Во многих зернах плагиоклаза и ксеноморфного кварца из трондьемитового плагиогнейса (обр. 39861 с глубины 10870 м) содержатся вторичные газовой-жидкие (\pm кристаллик NaCl) включения водных растворов. В кварце среди вторичных включений водных растворов встречаются однофазовые включения жидкого CO_2 . Гомогенизируются вторичные включения в интервале температур 160 - 230°C . По данным замораживания, они заполнены Ca-Na хлоридными растворами с концентрацией до 30 мас.% по NaCl -эквиваленту. В мелких (0,1-0,2 мм) изометричных зернах кварца в плагиоклазе встречаются первичные однофазовые флюидные включения и сингенетичные газовой-жидкие включения водных растворов (с концентрацией NaCl до 30 мас.%). Эти разные по составу флюидные включения иногда содержатся в одном зерне кварца. Включения маленькие (до 4 мкм), хорошо ограненные. По данным замораживания, однофазовые включения имеют температуру гомогенизации $\sim 4,5^\circ\text{C}$ и температуру плавления твердого CO_2 около $(-62)^\circ\text{C}$. Согласно экспериментальным данным (Hollister, Burrus, 1976; Swanenberg, 1979; Томиленко, Чупин, 1983; Kerkhof, 1988), такие включения могут содержать жидкий CO_2 с примесью азота и/или метана (до 10-15 мол.%). Рамановские микрозондовые анализы двух включений показали, что они содержат жидкий CO_2 (90-91 мол.%), азот (8-9 мол.%) и метан (до мол.%). Плотность изученных включений составляла $\sim 0,8$ г/см³.

Флюидные включения в плагиоклазе и кварце из тоналитового плагиогнейса с глубины 11125 м (обр. 40302) встречаются значительно реже, чем в обр. 39861. Первичные однофазовые включения найдены в маленьком (размером ~0,15 мм) изометричном зерне кварца в плагиоклазе. Включения мелкие (1-3 мкм), частично ограненные. Судя по температуре плавления твердого CO_2 (-60°C), включения также содержат жидкий CO_2 с примесью азота и метана. Их плотность ($0,90-0,85 \text{ г/см}^3$) немного больше, чем в трондьемитовом плагиогнейсе обр. 39861.

4. Обсуждение результатов и выводы

Полученные данные позволяют выделить в изученных образцах плагиогнейсов восьмой толщи СГ-3 цирконы магматического и метаморфического генезиса.

К цирконам первого типа отнесены зерна (ядра и оболочки в зернах) сложного строения, а также однородные призматические кристаллы, составляющие преобладающую часть кристаллов изученных монофракций. Для рассматриваемых зерен циркона характерно присутствие первичных расплавных включений как в ядрах и оболочках сложных кристаллов, так и в однородных призматических кристаллах циркона с содержанием $\text{HfO}_2 \leq 1,25 \text{ мас.}\%$, что свидетельствует об их магматическом происхождении. По геохимическим особенностям – низкой концентрации Cl и F в расплавных включениях и содержанию HfO_2 в цирконе – внутренние части оболочек аналогичны внешним частям призматических кристаллов с такой концентрацией HfO_2 . Это позволяет считать когенетичными однородные призматические зерна и сложные зерна кристаллов циркона, которые относятся, вероятнее всего, к наиболее древним первично магматическим цирконам протолитов гнейсов. Судя по предварительной оптической и термометрической диагностике, призматические кристаллы циркона содержат стекловатые включения, что является прямым доказательством эффузивного происхождения протолитов.

Ко второму типу отнесены сложно ограненные, изометричные зерна циркона, в которых не обнаружены расплавные включения, но присутствуют первичные включения водных растворов, что позволяет предполагать кристаллизацию циркона рассматриваемого морфологического типа при метаморфизме протолитов гнейсов. Характерной чертой состава этих цирконов являются повышенные концентрации UO_2 (до $0,25 \text{ мас.}\%$) в промежуточных и краевых частях кристаллов.

Важным критерием магматического генезиса цирконов первого типа является наличие в них расплавных включений, изучение которых позволяет определить состав и эволюцию состава расплавов в период кристаллизации циркона. Характерной особенностью включений является разнообразие их составов (табл. 1, рис. 3). Концентрации преобладающих главных компонентов расплавных включений в ряде случаев существенно отличаются от содержания этих компонентов во вмещающем плагиогнейсе (обр. 26), состав которого в первом приближении может быть, вероятно, принят за состав исходного расплава.

По отношению к составу обр. 26 расплавные включения подразделяются на 2 группы: с более низкими и более высокими концентрациями SiO_2 (включения 1-3 и 4-14, соответственно). Включения 1-3 характеризуются повышенными содержаниями FeO, MgO, CaO, K_2O , F и Cl при пониженных концентрациях Al_2O_3 и Na_2O . Отсутствие корреляционных зависимостей между количеством FeO, CaO и глинозема можно объяснить тем, что преобладающая часть этих компонентов, возможно, входила в состав магнетита (FeO) и апатита (CaO, F), которые в виде ксеногенных микрозерен были захвачены вместе с расплавными включениями. Принимая соотношение MgO:FeO в рассматриваемых расплавных включениях по аналогии с обр. 26 равным 0,3 и полагая, что плагиоклаз включений соответствовал олигоклазу (An = 20%), нами пересчитан состав расплавных включений 1-3 за вычетом эквивалентного избытку FeO и CaO количества апатита и магнетита. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Как следует из этих данных, пересчитанные составы расплавных включений 1-3 соответствуют низкощелочному риодациту (включение 1) и риолиту (2, 3) и по содержанию кремнезема, щелочей и соотношению щелочей располагаются в поле составов группы включений с повышенными концентрацией SiO_2 (4-14) и значением отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. Таким образом, можно полагать, что все или преобладающая часть расплавных включений отличаются от состава вмещающего плагиогнейса повышенным содержанием SiO_2 и K_2O .

Полученные данные по составу расплавных и флюидных включений, а также микрофенокритов в цирконе свидетельствуют о сложной истории кристаллизации этого минерала и эволюции состава захваченных кристаллами циркона включений.

Таблица 2. Состав расплавных включений 1-3 (мас.%) за вычетом апатита (Ап) и магнетита (Мт)

№	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Cl	F	Сумма	Ап	Мт
1	75,5	0,4	14,5	1,3	0,8	0,9	3,5	2,9	0,1	0,1	100,0	6,0	9,0
2	76,8	0,4	12,0	1,3	0,8	0,9	3,6	4,0	0,1	0,1	100,0	6,8	8,7
3	75,0	0,2	14,0	1,6	1,3	0,2	3,1	4,5	0	0,1	100,0	1,5	11,4

В ранний этап магматической кристаллизации были образованы призматические зерна циркона первого типа из расплава, материнского для плагиогнейса обр. 26 и представленного первично вулканической породой плагиориодацитового состава. Как следует из анализа сростков микрофенокристов в цирконе, кристаллизация исходных плагиориодацитовых расплавов, вероятно, начиналась с образования микрозерен калийсодержащего плагиоклаза ($Ab_{61}, An_{26}, Or_{13}$) и титаномагнетита. Возможно, на этом этапе начинали кристаллизоваться также зерна циркона, некоторые из которых захватывали включения жидкого CO_2 и сингенетичные расплавные включения. Наличие таких включений указывает на кристаллизацию ранних цирконов из насыщенных CO_2 магм при давлении отделяющихся флюидов около 3,5 кбар. Предполагаемая кристаллизация происходила в промежуточном магматическом очаге на глубине около 13 км. При быстром подъеме расплава к поверхности происходило частичное растворение микрозерен плагиоклаза и циркона.

При излиянии на поверхность потоки кислых магм вследствие высокой вязкости могли достигать мощности в несколько метров, что создавало условия для быстрой неравновесной кристаллизации расплавов во внутренних частях потоков с образованием небольших очагов и интерстициальных обособлений остаточных плагиориодацитовых-риолитовых магм более кислого состава. Состав остаточных расплавов определялся, главным образом, степенью раскристаллизации материнских расплавов. Остаточные расплавы были концентраторами некогерентных элементов (Zr, Hf, P, R3Э и др.), что приводило при их охлаждении к кристаллизации основной массы акцессорных минералов – однородных призматических зерен циркона первого типа, апатита, алланита. С этим этапом, вероятно, связано образование оболочек сложных кристаллов циркона. Эволюция составов по мере кристаллизации остаточных магм в целом была выражена увеличением концентраций SiO_2 и K_2O , что отчетливо проявлено в смещении точек состава от ранних к более поздним расплавным включениям по направлению к кварц-ортоклазовой стороне диаграммы Ab-Qtz-Or (рис. 4b). Прямым подтверждением указанной эволюции расплавов является присутствие микрофенокристов калийсодержащих плагиоклазов (An_{15-26}, Or_{7-13}) в центральных частях кристаллов циркона и K-Na полевого шпата (Or_{60}, Ab_{40}) во внешних частях его зерен. Наличие микросростков кварца с альбитом (An_{10}, Or_{11}) и (An_3, Or_1), а не с олигоклазом, указывает, вероятно, на образование основной массы кварца в завершающую стадию кристаллизации.

Заключительный этап формирования кристаллов циркона происходил при метаморфизме пород, в результате чего первично эффузивные породы были перекристаллизованы и превращены в плагиогнейсы. Первично магматические зерна циркона подвергались незначительному растворению и частичной регенерации, особенно вдоль трещинок, фиксируемых в настоящее время цепочками вторичных включений. В это же время были образованы сложноограниченные изометричные кристаллы циркона, содержащие первичные включения хлоридных растворов, аналогичные первичным включениям хлоридных растворов в плагиоклазе и кварце из плагиогнейсов. Изучение состава включений показывает, что метаморфические растворы имели углекислотно-водно-хлоридный состав с примесью N_2 и CH_4 . Учитывая сингенетичность захвата этих разных по составу флюидных включений, следует предполагать гетерогенность метаморфических растворов, состоящих из двух несмесимых фаз (хлоридного раствора и плотного CO_2 с примесью N_2 и CH_4). Давление флюида, оцененное по включениям водных растворов и богатым CO_2 включениям, достигало 2,8-4,0 кбар при $T = 540-620^\circ C$, что отвечает условиям амфиболитового метаморфизма при образовании изученных гнейсов (Кольская сверхглубокая, 1984).

Благодарности. Авторы признательны О.М. Туркиной за обсуждение статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты 02-05-65074 и 02-05-64394).

Литература

- Barker F.** Trondhjemites: Definition, environment and hypothesis of origin. In: "Trondhjemites, Dacites and Related Rocks". Elsevier, Amsterdam, p.1-12, 1979.
- Chupin S.V., Chupin V.P., Barton J.M., Barton E.S.** Archean melt inclusions in zircon from quartzite and granitic orthogneiss from South Africa: magma compositions and probable sources of protoliths. *Eur. J. Mineral.*, v.10, N 6, p.1241-1251, 1998.
- Hollister L.S., Burrus R.C.** Phase equilibria in fluid inclusions from the Khtada Lake metamorphic complex. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v.40, p.163-175, 1976.
- Inger S., Harris N.B.W.** Geochemical constraints on leucogranite magmatism in the Lantang valley, Nepal Himalaya. *J. Petrol.*, p.345-368, 1993.

- Kerkhof A.M.** The system CO₂-CH₄-N₂ in fluid inclusions: Theoretical modeling and geological applications. *Amsterdam, Free University Pres.*, 206 p., 1988.
- Roedder E.** Fluid inclusions. *Rev. Mineral.*, v.12, 644 p., 1984.
- Swanenberg H.E.C.** Phase equilibria in carbonic systems and their application to freezing studies of fluid inclusions. *Contr. Mineral. Petrol.*, v.68, p.303-306, 1979.
- Базарова Т.Ю., Бакуменко И.Т., Костюк В.П., Панина Л.И., Соболев В.С., Чепуров А.И.** Магматогенная кристаллизация по данным изучения включений расплавов. *Новосибирск, Наука*, 232 с., 1975.
- Варгафтик Н.Б.** Таблицы термодинамических свойств газов и жидкостей. *М., Наука*, 720 с., 1972.
- Ермаков Н.П., Долгов Ю.А.** Термобарогеохимия. *М., Недра*, 271 с., 1979.
- Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. Под ред. Козловского Е.А. *М., Недра*, 490 с., 1984.
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования. Под ред. Орлова В.П., Лаверова Н.П. *М., МФ "Технонефтегаз"*, 260 с., 1998.
- Ризванова Н.Г., Левченков О.А., Белоус А.Е., Безмен Н.И., Маслеников А.В., Комаров А.Н., Левский Л.К.** Динамика взаимодействия циркона с гидротермальным углекислым флюидом. *Геохимия*, № 3, с.253-263, 1996.
- Томиленко А.А., Чупин В.П.** Термобарогеохимия метаморфических комплексов. *Новосибирск, Наука*, 201 с., 1983.
- Чупин В.П., Томиленко А.А., Чупин С.В.** Происхождение гранулитовых комплексов: результаты изучения расплавных и флюидных включений в цирконе и породообразующих минералах *Геология и геофизика*, т.34, № 12, с.116-131, 1993.
- Чупин В.П., Чупин С.В., Поспелова Л.Н., Котов А.Б., Степанюк Л.М.** Расплавные включения в цирконе из архейских гнейсов как показатель происхождения протолитов и состава древнейших магм. *Докл. АН*, т.338, № 6, с.806-810, 1994.