

МИНЕРАЛОГИЯ ТАЛНАХСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ГРОССУЛЯРА, ВЕЗУВИАНА И АХТАРАНДИТА

М.С. Алферова

Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН, Москва, alferova.m@gmail.com

Ахтарандит — псевдоморфоза, состоящая из минералов группы серпентина, хлорита, гроссуляра, карбонатов, по неизвестному минералу — до настоящего времени является загадкой минералогии. Второе в мире проявление ахтарандита у подножия г. Отдельной (Талнах) по минеральному составу главных составляющих идентично проявлению гроссуляра, вилюита и ахтарандита в долине р. Вилюй — месту первой находки данной псевдоморфозы. Приведены данные комплексного изучения главных породообразующих минералов и образований проявления г. Отдельной — гроссуляра, везувиана и ахтарандита, в том числе: взаимоотношений в породе, морфологии кристаллов, химического состава, а также минеральных и флюидных включений в них.

Проведены экспериментальные исследования по синтезу предполагаемой протофазы ахтарандита — хлорсодержащего майенита.

Установлено, что образование специфической минеральной ассоциации с ахтарандитом происходило, как минимум, в две стадии: скарновой и апоскарновой. На первой стадии образованы ядра кристаллов граната и везувиана, авгит, сохранившийся в виде включений в везувиане, и хлорсодержащий майенит. На второй стадии образованы краевые части кристаллов граната и везувиана, амезит, титанит, троилит, а хлорсодержащий майенит замещен ахтарандитом.

В статье 7 таблиц, 8 рисунков и список литературы из 28 наименований.

Проявление гроссуляра, везувиана и ахтарандита г. Отдельной в Талнахском районе, расположенном в краевой северо-западной части Сибирской платформы, по минеральному составу является аналогом месторождения гроссуляра, вилюита и ахтарандита в долине р. Вилюй, описанного в 1821 г. К. Лаксманом (Ляхович, 1954; Жабин, Ляхович, 1994). Уникальные по вещественному составу породы, содержащие гранат, везувиан и ахтарандит (рис. 1), были обнаружены в 2000 г. (Плетнев, Алферова и др., 2001) недалеко от рудника «Маяк», у подножия г. Отдельной, возле поисковой скважины 1956 г.

Геолого-петрографическая характеристика проявления гроссуляра, везувиана и ахтарандита

Плитный комплекс представлен полого залегающими терригенными, карбонатными (известняки, доломиты, мергели), сульфатно-карбонатными и иными отложениями верхнего докембрия и раннего-среднего палеозоя (кембрий — девон), мощностью около 3 км. На них залегают терригенные угленосные отложения тунгусской серии карбона-перми, мощностью до 0.5 км. Выше залегают лавовые и туфовые толщи траптовой формации P₃-T₁, мощностью около 3.5 км. Вулканиты траптовой формации сопровождаются многочисленными интрузивами долеритов и габбро-долеритов, в том числе рудо-

носными, с сульфидными Fe-Cu-Ni-Co рудами (Годлевский, 1959). Рудоносные интрузивы — это расслоенные массивы, в нижней части представленные пикритовыми габбро-долеритами с массой сульфидных капель, в верхней части — лейкократовыми габбро-долеритами с массой ксенолитов роговиков и мелких шлиров, обогащенных оливином и хромшпинелидами, а также сульфидами. Рудоносные интрузивы окружены широким ореолом ороговикованных пород пироксен-роговиковой и альбит-эпидот-роговиковой фаций, включая известково-силикатные и магнезиально-силикатные роговики (скарноиды) и разнообразные магнезиальные и известковые скарны. Возраст пород траптовой формации 245±3 — 5 млн. лет, что отвечает границе перми и триаса (Спиридонов и др., 2000).

Проявление гроссуляра, везувиана и ахтарандита представляет собой блоки сильно измененных терригенных пород плитного комплекса (Є₃ — D₁), сложенного песчаниками с доломитовым цементом, известняками, доломитами, мергелями, заключенных в виде ксенолитов во фронтальной части северо-восточной ветви Верхнеталнахского интрузива (T₁₋₂), сложенной такситовыми габбро-долеритами. Лейкократовые габбро-долериты были подвержены пятнистой и, местами, сплошной альбитизации и пренитизации в условиях пренит-пумпеллиитовой фации низкоградного метаморфизма. Они состоят из плагиоклаза, клинопироксена, сульфидов,

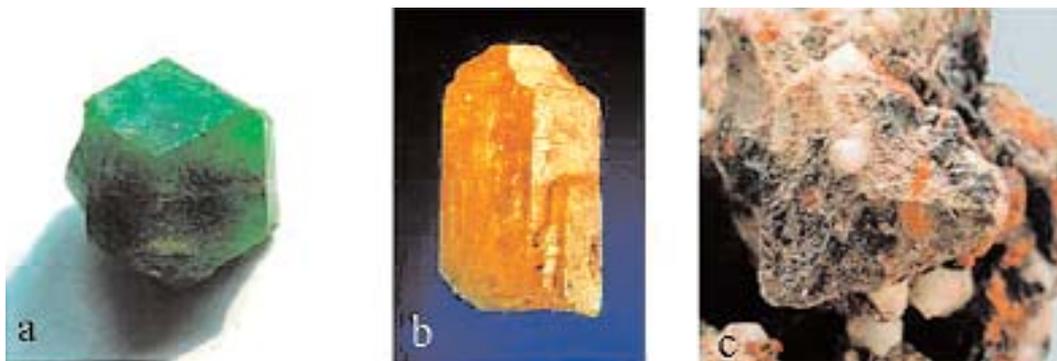


Рис. 1. Минералы проявления г. Отдельной, Талнах: а – гроссуляр (размер кристалла 5 мм), б – везувиан (длина кристалла 4 мм), с – ахтарандит (размер кристалла 6 мм)

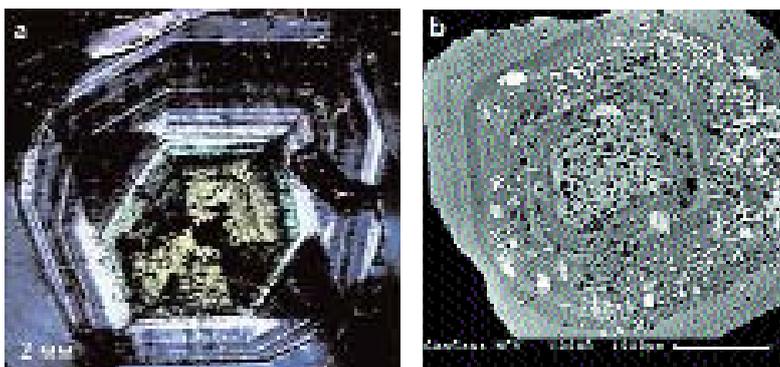


Рис. 2. Внутреннее строение кристаллов хром-титан-содержащего гроссуляра г. Отдельной, Талнах: а – в шлифе, б – в обратно-рассеянных электронах

апатита, титанита, хлоритовых минералов. Измененные роговики и скарны среди лейкогаббро представлены разнозернистыми агрегатами гроссуляра белого и желтоватого цвета, хром-титан-содержащего гроссуляра от густо-зеленого до светло-зеленого цвета, гидрогроссуляра, везувиана, ахтарандита, хромшпинелида, кальцита, хлоритовых минералов, ангидрита, диопсида, пренита, серпентина в ассоциации с пирротинном, пиритом, сфалеритом, халькопиритом, а также продуктов выветривания. Размер выделений этих минералов – от долей миллиметра до 12 мм. Очень часто лейкогаббро образуют инъекции сложной формы в роговики и скарны.

Минералогия

Главными породообразующими минералами на описываемом проявлении являются гроссуляр, везувиан и ахтарандит. Их мегакристы развиты в мелкозернистой массе, сложной гроссуляром, гидрогроссуляром, пиритом, халькопиритом, оксидами железа. Породы часто не сцементированы.

Гроссуляр – наиболее распространенный на проявлении минерал. Кристаллы граната и их сростки встречены в виде вкрапленников, прожилков и мономинеральных агрегатов в измененных лейкогаббро.

На проявлении г. Отдельной гроссуляр образует скопления до десятков сантиметров и слагает породы на 60–80%. Минерал представлен хорошо ограненными кристаллами, размером от 0,5–1 до 8–10 мм, и их сростками. Наиболее часто встречаются простые формы: {110}, {112}, {321} и их комбинации. Кристаллы граната, как правило, характеризуются резкой цветовой зональностью; центральная часть – темно-зеленого цвета, периферийная – бесцветная. Кристаллы макроскопически светло-зеленого цвета содержат множество перемежающихся тонких темно-зеленых и бесцветных слоев. В шлифах видно, что гранат анизотропен, секториален и тонкозонален (рис. 2). Во внутренней зоне наблюдаются прямые (расширяющиеся к краю) сектора роста, а во внешней, бесцветной – обратные (сужающиеся к краю).

По химическому составу гранат также неоднороден: центральные части зональных кристаллов и темно-зеленые кристаллы отвечают хром-титан-содержащей разновидности гроссуляра, а краевые – его практически «чистому» миналу (табл. 1). Составы разных частей граната представлены на рисунке 3. Картина распределения минералообразую-

Таблица 1. Состав (мас. %) граната проявления г. Отдельной, Талнах

№ анализа	центр					край				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	34,78	36,13	35,90	39,37	39,81	40,40	35,52	36,49	39,89	39,91
TiO ₂	6,47	5,70	5,30	1,38	—	0,21	6,89	5,05	—	0,11
Al ₂ O ₃	11,44	13,06	12,88	20,70	22,23	21,92	10,89	12,45	22,12	21,99
Fe ₂ O ₃	0,51	0,37	0,42	—	0,13	—	0,70	0,45	0,08	0,13
MnO	—	0,10	—	0,02	0,20	0,17	0,06	—	—	—
MgO	1,57	1,69	1,36	1,11	1,07	0,71	1,71	1,25	1,25	1,20
CaO	35,94	35,30	35,72	36,56	36,39	36,51	34,93	34,93	35,86	36,05
Cr ₂ O ₃	8,97	6,91	7,83	0,57	0,02	0,06	9,03	8,94	—	0,15
V ₂ O ₃	0,16	0,33	0,08	0,28	—	—	—	0,07	0,10	0,01
ZnO	0,01	0,25	0,11	—	—	—	0,15	0,12	0,22	0,24
Сумма	99,85	99,84	99,60	99,99	99,85	99,98	99,88	99,75	99,52	99,79

Примечание: 1–6 электронный микроскоп «CamScan», аналитик Н.Н. Коротаева; 7–10 электронный микроскоп «Сamebax SX-50», аналитик Н.Н. Кононкова. Зональные кристаллы анализировались от центра к краю с шагом 200 и 400 мкм

щих и примесных элементов в зональных кристаллах хром-титан-содержащего гроссуляра следующая: центральная часть кристаллов обогащена хромом, титаном и обеднена кремнием; периферийная часть обогащена кальцием и кремнием. ИК-спектр периферийной, бесцветной части кристаллов граната соответствует стехиометричному безводному гроссуляру. В области колебаний 3800–3400 нм⁻¹ для центральной темно-зеленой зоны наблюдается слабый прогиб, свидетельствующий о наличии ОН-групп в структуре. По данным термического анализа бесцветной и светло-зеленой частей кристалла (представляющей собой тонкое чередование темно-зеленой и бесцветной составляющих),

потеря веса составила 1,1 мас.% для бесцветной зоны и 1,6 мас.% — для светло-зеленой. Центральная зона не исследовалась термическим анализом из-за сложности приготовления крупной пробы.

Параметр элементарной ячейки краевой части кристалла составляет $a_0 = 11,849 \text{ \AA}$, что по данным экспериментов Г.Ю. Шведенкова и Д.В. Калинина (Шведенков и др., 1974), соответствует безводному гроссуляру.

Хром-титан-содержащий гроссуляр Талнахского проявления представляет собой редкую безжелезистую разновидность этого минерала, которую, благодаря ярко-зеленой окраске, иногда называют «сибирским цаворитом». Окраска и, следовательно, декора-

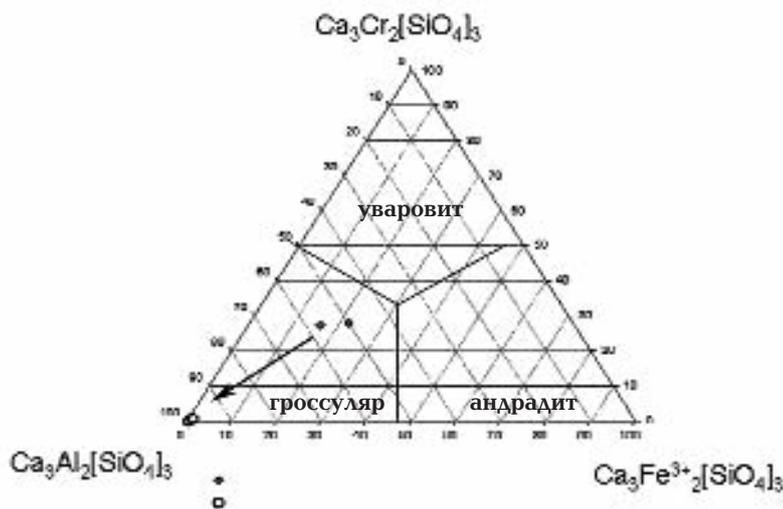


Рис. 3. Состав хром-титан-содержащего гроссуляра г. Отдельной, Талнах

тивные качества данного материала возникли в специфической геохимической обстановке района, характеризующейся высокой активностью S (a_s), благодаря чему все Fe было связано в форме сульфидов и не вошло в состав силикатов и хромшпинелидов описываемого проявления. Различие между цаворитом — ванадий-хром-содержащим гроссуляром из Танзании и изученными образцами выявляется на оптических спектрах. Окраска цаворита возникает за счет Cr^{3+} и V^{3+} , присутствие которых выражается в сложной, двоянной полосе поглощения в области 480 — 580 нм видимой части спектра. В хром-титан-содержащем гроссуляре Талнаха окраска вызвана ионами Cr^{3+} ; в оптическом спектре наблюдается одна полоса поглощения в области 480 — 580 нм, смещенная, относительно таковой у цаворита, в коротковолновую область.

Хром-титан-содержащий гроссуляр Талнаха насыщен многочисленными минеральными включениями. Они представлены хромшпинелидами, везувианом, амезитом, стильбитом, сульфидами Fe и Cu. Кроме того, в нем присутствуют и флюидные включения.

Хромшпинелиды. Большинство кристаллов граната Талнаха содержат многочисленные включения хромшпинелидов. Скопления и цепочки изометричных коричневатокрасных прозрачных кристаллов хромшпинелида — магнезиохромита — расположены по зонам роста как в темно-зеленой, так и в бесцветной частях кристаллов граната (рис. 4). Как правило, зерна хромшпинелида тонкоzonальны. Состав этого хромшпинелида приведен в таблице 2 и соответствует алюмо-содержащему магнезиохромиту — промежуточному члену в системе $MgCr_2O_4 - MgAl_2O_4$ (табл. 2). В составе магнезиохромита отсутствуют миналы магнетита, хромита, герцинита,

т. е. этот хромшпинелид абсолютно безжелезистый, из чего можно сделать вывод о невысоких температурах и о высокой активности серы в процессе его образования. По теоретическим расчетам (Sack & Ghiorso, 1991) в системе $MgCr_2O_4 - MgAl_2O_4$ выше 550°C существует непрерывный ряд твердых растворов, ниже этой температуры кристаллизуются хромшпинелиды с определенным соотношением $MgCr_2O_4:MgAl_2O_4$ (на кривой сольвуса). По данным В.В. Рябова (Рябов и др., 1996) соотношение $MgCr_2O_4:MgAl_2O_4$ в хромшпинелидах из родингитовых гранатов г. Отдельной может быть равным как 4:1 (магнезиохромит), так и 1:4 (алюмо-содержащий магнезиохромит). Если провести через эти составы конноду, можно получить температуру образования хромшпинелида. Составы изученных хромшпинелидов лежат в области $MgCr_2O_4:MgAl_2O_4 = 4:1$, что соответствует температурам 300 — 400°C.

Несмотря на высокую хромистость (до 82,2%), вокруг зерен хромшпинелида не наблюдается повышенной концентрации хрома, что характерно для множества метаморфогенных минералов, образованных позже хромшпинелидов (изумруд, нефрит...); поэтому, скорее всего, данный хромшпинелид новообразованный, не претерпевший изменений, парагенный гранату. Значения температур образования родингитовых гранатов, по экспериментальным данным (Плюснина и др., 1993), определенных по газовой-жидким включениям в исследуемых гранатах, и теоретические температуры образования алюмо-содержащего магнезиохромита лежат в области не выше 400°C, т.е. сопоставимы друг с другом по порядку. Высокая активность серы подтверждается наличием пирита и халькопирита в парагенезисе с хромшпинелидом.

По данным рентгеновской томографии,

Таблица 2. Состав (мас. %) хромшпинелида — включения в гранате проявления г. Отдельной, Талнах

№ анализа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Al_2O_3	9,87	11,48	10,80	10,30	8,24	10,40	7,78	9,26	10,08	9,96	6,65
FeO	—	0,20	0,36	0,61	1,14	1,53	1,68	1,67	1,77	1,97	1,95
Fe_2O_3	0,73	0,52	—	—	—	—	0,39	—	—	—	—
MnO	0,37	0,59	0,51	0,22	0,62	0,30	0,43	0,95	0,52	0,68	0,74
MgO	21,53	21,15	21,31	20,89	20,34	19,98	20,35	19,84	20,35	19,97	19,94
Cr_2O_3	63,98	64,35	65,64	67,04	68,41	66,10	67,56	67,25	66,13	66,65	70,15
NiO	н.о.	—	—	0,02	—	—	0,24	—	—	—	—
ZnO	0,21	0,20	0,24	0,05	0,18	0,55	0,32	0,36	—	0,29	—
сумма	97,56	98,49	98,86	99,13	98,93	98,86	98,75	99,33	98,85	99,52	99,43

Примечание: ан. 1 — электронный микрозонд «Camebax SX-50», аналитик Н.Н. Кононкова; электронный микрозонд «CamScan» ан. 2, 3, 5, 6, 8 — 11 — аналитик Н.Н. Коротаяева, ан. 4, 7 — аналитик Е.В. Гусева

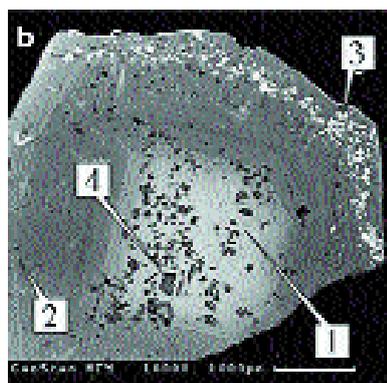
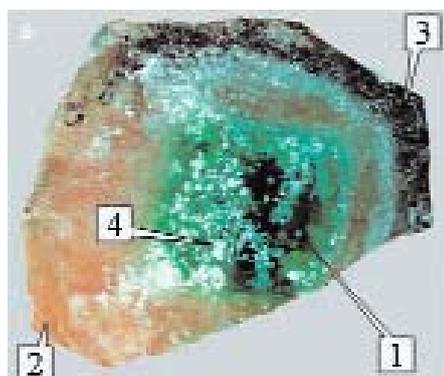


Рис. 4. Включения в кристалле граната г. Отдельной, Талнах: а – в отраженном свете, б – в обратно-рассеянных электронах.

1 – хром-титан-содержащий гроссуляр, 2 – гидрогроссуляр, 3 – магнезиохромит, 4 – везувиан-амезитовый агрегат

выполненной на нескольких зональных кристаллах хром-титан-содержащего гроссуляра г. Отдельной, Талнах, центральная часть ярко-зеленого цвета, обогащенная хромом и титаном, не содержит реликтов исходного хромшпинелида или содержит их крайне редко.

Троилит

Наряду с включениями метаморфогенно-алюмо-содержащего магнезиохромита в гроссуляре присутствуют ксеноморфные вроски троилита $Fe_{0,64}Ni_{0,36}Co_{0,01}S_{0,99}$, типичного образования низкоградного метаморфизма.

Везувиан и амезит

Очень широко во всех зонах кристаллов граната развиты включения белого непрозрачного минерала с квадратными и ромбовидными сечениями. Иногда его ажурные вы-

деления располагаются во всем объеме кристалла – тогда последний становится непрозрачным, с молочно-белым оттенком; но чаще эти включения находятся на границе зон и секторов роста (рис. 4). Включения состоят из везувиана и амезита, находящихся в тонком срастании. Составы везувиана и амезита приведены в таблице 3. Теоретическую формулу везувиана можно записать как $Ca_{19}(Al, Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, \dots)_{13}(B, \square)_5 [SiO_4]_{10}[Si_2O_7]_4(OH, O, F)_{10}$. Расчет эмпирических формул везувиана производился на 50 катионов, содержание В рассчитывалось по балансу валентностей, исходя из соображений стехиометрии. Полученная формула везувиана следующая: $Ca_{19,00}(Al_{10,28}Mg_{2,55}Fe^{2+}_{0,05}Cr_{0,05}Ti_{0,01}Ni_{0,02}Zn_{0,06})_{13,02}(B_{0,66}\square_{4,34})_5[(Si_{15,66}Al_{2,34})_{18}O_{68}](Cl_{0,68}(OH)_{9,32})_{10}$. Состав амезита отвечает эмпирической формуле: $(Mg_{3,68}Fe^{2+}_{0,10}Mn_{0,07}Ni_{0,02}Zn_{0,01})_{3,88}(Al_{1,92}Cr_{0,02})_{1,94}$

Таблица 3. Состав (мас. %) везувиана (1–4), амезита (5–6) и стильбита (7–9) из включений в гранате (г. Отдельная, Талнах)

№ анализа	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	33,65	34,53	34,00	33,98	25,97	26,79	60,53	59,78	61,08
комп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TiO ₂	0,02	0,08	–	–	0,16	–	0,02	0,02	0,08
Al ₂ O ₃	23,01	20,87	20,05	21,41	41,28	39,75	13,81	14,21	14,87
FeO	0,13	0,09	0,20	0,14	0,87	1,42	0,13	0,11	0,16
MnO	–	–	0,02	0,12	0,44	0,99	0,05	–	–
MgO	3,67	3,90	4,17	3,44	30,55	29,92	0,05	0,09	0,08
CaO	38,11	40,31	40,99	39,70	–	–	8,08	7,87	8,19
Cr ₂ O ₃	0,13	0,17	0,18	0,13	0,11	0,28	–	0,05	–
NiO	0,05	–	–	–	сл.	0,22	н.о.	н.о.	н.о.
ZnO	0,17	–	0,39	–	–	0,14	–	–	–
Cl	0,86	н.о.	н.о.	0,86	–	–	–	–	0,01
сумма	99,79	99,95	100,0	99,78	99,38	99,51	82,67	82,13	84,47

Примечание: ан. 1–6 – электронный микрозонд «CamScan», ан. 2,3 – аналитик Н.Н. Коротаева, ан. 1,4–6 – аналитик Е.В. Гусева; ан. 7–9 – электронный микрозонд «Camebax SX-50», аналитик Н.Н. Кононкова. н.о. – не определялось

Таблица 4. Сводная таблица температур образования граната г. Отдельной, Талнах

Цвет, (зона)	T _{гом.} , °C	Количество включений	T _{звт.} , °C	T _{пальца.} , °C
зеленый (центр)	243 – 231	6		
бесцветный (край)	206 – 186	7		
светло-серый	215 – 196	8		
бесцветный (край)	286	3	-32	-2.0
бесцветный (край)	167 – 137	17	-33	-2.0 – 1.9

Примечание: термокриякамера THMSG-600 Linkam, аналитик В.Ю. Прокофьев

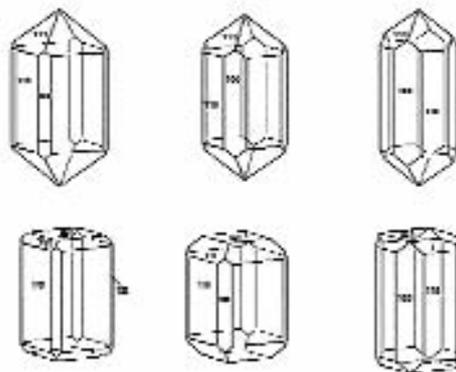
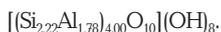


Рис. 5. Простые формы кристаллов везувиана г. Отдельной, Талнах



Стильбит

Нередко в различных частях кристаллов граната содержатся бесформенные, изогнутые вростки белого непрозрачного минерала, представленные стильбитом. Состав стильбита приведен в таблице 3 и отвечает формуле $(Ca_{1.35}Na_{0.01}Fe_{0.01}Al_{2.53}Si_{9.42}O_{24})_9(H_2O)$.

Флюидные включения

В исследуемых кристаллах граната были обнаружены газовой-жидкие включения, по которым были сделаны оценки температур образования. Включения представлены первичными, первично-вторичными (часто расшнурованы) и вторичными. Размер включений, в лучшем случае, достигает 10 – 15 мкм. По включениям, в которых видны фазовые переходы, компонентный состав водно-солевой системы диагностирован как $MgCl_2 - H_2O$ с концентрацией солей 3,23 – 3,39 мас. % экв. NaCl (Прокофьев В.Ю. и др., 1999). Результаты измерений сведены в таблицу 4.

Везувиан в родинитоподобных породах Талнахской интрузии встречается в виде друзовидных обособлений хорошо образованных кристаллов. Размеры кристаллов наиболее крупных обособлений составляют по оси *c* – 5–7 мм, по оси *a* – 3–4 мм. Окраска везувиана варьирует от желтовато-зеленой до фиштакково-зеленой, нередко пятнистое распределение цвета (от зеленого до коричневатого-желтого), отдельные небольшие участки – прозрачные, без трещин и включений. Грани всех кристаллов везувиана под бинокляром обнаруживают блочное строение, борозды, ямки и каналы травления, растворения и коррозии. Кристаллы по

морфологии напоминают вилюит.

Для измерения на гониометре было отобрано 10 кристаллов. Характерной чертой изогнутых кристаллов является бедность их простыми формами (рис. 5). Господствующее развитие имеют грани призм: {110} и {100}, дипирамиды {111}. Грани базопинакоида обычно имеют подчиненное развитие, а иногда и вовсе отсутствуют.

В шлифах видно, что кристаллы везувиана, как и гроссуляра, описанного выше, тонкозональны и секториальны. Нередко в них наблюдаются включения ярко-зеленого зонального хром-титан-содержащего гроссуляра и кальцита. Макроскопически кристаллы везувиана обнаруживают грубую зональность перпендикулярно оси *c*. Внутренняя зона обычно буровато-зеленого или буровато-желтого цвета со множеством газовой-жидких и минеральных включений окружена прозрачной внешней зоной. Граница между зонами не имеет четких кристаллографических очертаний и представляет собой окружность. Некоторые кристаллы имеют радиально-лучистое строение, заметное на срезе кристалла.

По данным микрозондового анализа (табл. 5), состав исследуемого везувиана отличается низким содержанием Fe, что свидетельствует о высокой активности S, а также значительным содержанием Cl и F. Расчет формулы везувиана производился на 50 катионов, содержание В и (ОН)-групп рассчитывалось по балансу валентностей, исходя из соображений стехиометрии. Наличие В подтверждается исследованиями везувиана методом ИК-спектроскопии.

Как видно из таблицы 5, от центра к краю

Таблица 5. Состав (мас. %) везувиана проявления г. Отдельной, Талнах

№ анализа	центр					край					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	37,58	36,42	37,27	37,04	37,32	37,32	36,66	36,59	35,78	36,39	37,19
TiO ₂	1,53	1,34	1,64	0,37	0,55	0,94	1,90	1,35	1,08	1,20	0,94
Al ₂ O ₃	15,14	14,98	15,49	17,23	17,68	17,21	14,23	15,37	16,06	16,03	17,03
FeO	0,12	0,06	—	0,17	0,17	0,15	0,28	0,11	0,09	0,11	0,21
MnO	0,06	—	—	сл.	0,05	0,03	—	0,03	0,02	0,10	—
MgO	5,80	6,00	5,75	5,03	4,33	4,73	5,72	5,94	5,23	5,43	5,06
Na ₂ O	0,01	0,01	—	0,02	0,07	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01
CaO	35,69	36,04	36,14	36,44	36,85	36,37	36,39	36,28	36,26	36,69	36,80
Cr ₂ O ₃	0,07	0,17	0,09	0,01	0,05	—	0,05	—	0,01	—	—
V ₂ O ₃	0,08	0,03	0,09	0,05	0,02	0,02	0,02	0,10	0,15	0,10	0,03
ZnO	0,16	0,25	—	—	0,11	—	0,12	0,09	—	0,03	—
Cl	0,05	0,05	0,02	0,10	0,04	0,09	0,04	0,01	0,12	0,06	0,14
F	0,74	0,98	0,84	0,90	0,81	1,22	0,75	0,91	1,39	1,41	1,47
B*	1,22	1,14	1,12	1,04	1,02	0,85	1,28	1,10	0,96	0,76	0,55
OH*	1,75	2,53	1,55	1,60	0,93	1,05	2,52	2,09	2,84	1,67	0,57
Сумма	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Формульные единицы в расчете на 50 катионов											
Ca	18,11	18,33	18,25	18,32	18,48	18,14	18,65	18,37	18,38	18,35	18,15
Na	0,01	0,01	—	0,02	0,06	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01
Mg	4,10	4,25	4,04	3,52	3,02	3,28	4,07	4,19	3,69	3,77	3,47
Mn	0,02	—	—	—	0,02	0,01	—	0,01	0,01	0,04	—
Zn	0,06	0,09	—	—	0,04	—	0,04	0,03	—	0,01	—
Fe ²⁺	0,05	0,02	—	0,07	0,07	0,06	0,11	0,04	0,04	0,04	0,08
Al	8,45	8,38	8,61	9,53	9,75	9,44	8,02	8,56	8,95	8,82	9,24
Cr	0,03	0,06	0,03	0,01	0,02	—	0,02	—	сл.	—	—
Ti	0,54	0,48	0,58	0,13	0,19	0,33	0,68	0,48	0,39	0,42	0,33
V	0,03	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,04	0,06	0,04	0,01
B*	3,22	3,00	2,95	2,71	2,65	2,20	3,42	2,90	2,57	1,96	1,41
Si	17,80	17,29	17,56	17,38	17,47	17,38	17,53	17,29	16,93	16,98	17,12
(OH) ₄ *	0,74	1,07	0,64	0,66	0,77	0,44	1,07	0,87	1,18	0,69	0,24
Cl	0,04	0,04	0,02	0,08	0,03	0,07	0,03	0,01	0,09	0,05	0,11
F	0,78	1,04	0,88	0,94	0,85	1,26	0,79	0,96	1,46	1,46	1,50

Примечание: электронный микрозонд «Camebax SX-50», аналитик Н.Н. Кононкова. * — рассчитано по балансу валентностей с учетом стехиометрии. Зональные кристаллы анализировались с шагом 300 мкм

кристаллов везувиана несколько снижается содержание Ti, Cr, B, и повышается содержание Cl и F, что, возможно, свидетельствует о повышении активности Cl и F в заключительные стадии образования везувиана. Снижение содержания Ti и Cr в грубозональных кристаллах, вероятно, соответствует снижению содержания Ti и Cr в зональных кристаллах граната, описанных выше, что является еще одним доказательством парагенезиса темно-зеленого раннего хром-титан-содержащего гроссуляра и везувиана.

Инфракрасные спектры талнахского ве-

зувиана подобны ИК-спектрам вилюита (Куржковская и др., 2004); в них также наблюдаются полосы колебаний групп [BO₃] и [BO₄]. По данным микрозондового анализа, везувиан г. Отдельной содержит до 1,5 мас. % F, что является промежуточным значением по сравнению с везувианом скарнов (до 2 мас. % F) и родингитов (до 0,6 мас. % F) (Allen & Burnham, 1992; Armburster & Gnos, 2000).

Везувиан Талнаха содержит минеральные включения, представленные авгитом, перовскитом, титанитом, хром-титан-содержащим гроссуляром, гидргроссуляром и

Таблица 6. Состав (мас. %) авгита (1–2), перовскита (3–4), титанита (5) и везувиан-гидрогранатового агрегата (6–8) из включений в везувиане (г. Отдельная, Талнах)

комп.	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	45.77	46.08	–	–	31.29	35.88	36.02	36.26
TiO ₂	1.85	1.62	57.79	55.01	30.85	0.14	0.03	0.02
Al ₂ O ₃	13.53	12.75	0.29	0.62	5.99	21.90	19.23	17.30
FeO*	0.08	0.05	–	–	0.09	0.58	0.55	0.17
Fe ₂ O ₃ *	–	–	0.07	0.36	–	–	–	–
MnO	0.09	0.01	–	–	0.04	0.27	0.19	0.12
MgO	13.29	13.25	0.01	0.01	сл.	3.90	3.06	4.55
CaO	25.71	25.81	40.79	39.33	29.24	32.41	36.59	37.53
Na ₂ O	0.04	0.02	0.17	сл.	–	0.03	0.01	–
Cr ₂ O ₃	0.22	0.47	0.45	0.80	0.20	0.15	0.06	0.01
V	–	–	0.26	0.13	0.12	0.05	–	0.07
ZnO	–	0.19	–	–	–	0.11	0.15	0.11
Cl	0.01	0.02	0.07	0.02	–	0.03	0.02	0.12
F	–	0.07	0.17	0.40	1.26	0.44	–	–
Сумма	100.59	100.34	100.07	96.68	99.08	95.89	95.89	96.25

Примечание: ан. 1–5 – электронный микрозонд «CamScan», ан. 1,2,5 – аналитик Е.В. Гусева, ан. 3,4 – аналитик Н.Н. Коротаева; ан. 6–8 – электронный микрозонд «Camebax SX-50», аналитик Н.Н. Кононкова

сульфидами Fe.

Авгит, перовскит, титанит, гидрогранат (?)

Включения авгита встречаются во всех кристаллах везувиана, преимущественно в центральной части. Под электронным микроскопом видно, что выделения авгита обладают хорошей огранкой, размер их до 100 мкм. Эмпирическая формула авгита соответствует Ca_{1,00}(Mg_{0,72}Al_{0,23}Ti_{0,05}Cr_{0,01})_{1,01}[Si_{1,67}Al_{0,33}]_{2,00}O₆. В тесном сростании с авгитом встречаются плохо ограненные обособления перовскита, его формула (Ca_{0,99}Na_{0,01})_{1,00}Ti_{0,98}O_{2,96}. В зернах авгита и перовскита отмечены вросстки титанита, расположенные в их периферийной зоне, размером до 30–50 мкм, вероятно, замещающего эти минералы. Обособленных включений титанита в везувиане встречено не было. Состав титанита отвечает формуле Ca_{1,01}(Ti_{0,75}Al_{0,23}Cr_{0,01})Si_{1,01}O_{4,85}F_{0,09} (табл. 6).

Включения авгита и перовскита – типичных минералов магнезиальных скарнов – свидетельствуют, вероятно, об образовании центральных зон кристаллов везувиана при повышенных температурах.

Включения граната встречаются в периферийных зонах кристаллов везувиана. В соответствии с результатами термобарогеохимических исследований граната заключительная стадия формирования кристаллов везувиана происходила при температурах

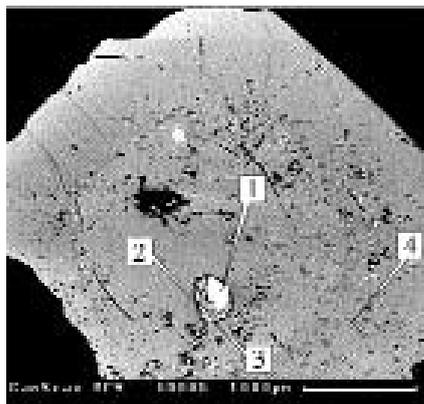


Рис. 6. Включения перовскита (1), авгита, (2), титанита (3), гидрогроссуляра (4) в кристаллах везувиана г. Отдельной, Талнах (изображение в обратно-рассеянных электронах)



Рис. 7. Кристаллы ахтарандита из нового проявления у подножия г. Отдельной Талнах: а – ограненный комбинацией прямого и обратного тригонитетраэдров, б – в сростании с Cr-Ti-гроссуляром и кальцитом (в шлифе)

Таблица 7. Состав ахтарандита:
1 – ахтарандит, г. Отдельная, Талнах;
2–5 – ахтарандит, р. Вилюй

комп.	1	2	3	4	5
SiO ₂	39.52	39.25	34.70	40.10	34.72
TiO ₂	0.24	—	0.30	—	0.31
Al ₂ O ₃	14.30	11.11	11.17	12.36	13.40
Fe ₂ O ₃	6.71	17.09	7.48	н.о.	5.42
FeO	—	—	1.95	н.о.	2.15
MnO	0.65	—	0.14	—	0.12
MgO	9.77	3.60	19.46	н.о.	19.40
CaO	22.54	12.54	17.03	11.27	16.60
Na ₂ O	0.07	—	н.о.	—	н.о.
K ₂ O	0.01	—	н.о.	—	н.о.
P ₂ O ₅	0.01	—	—	—	—
Cr ₂ O ₃	0.06	—	—	—	—
S	0.12	—	—	—	—
F	0.09	—	—	—	—
Cl	0.04	—	—	—	—
H ₂ O ⁻	—	—	0.56	—	0.83
H ₂ O ⁺	5.93	10.09	7.30	12.27	7.80
(П.п.п.)	—	—	—	—	—
CO ₂	—	—	0.54	—	н.о.
Сумма	100.06	93.68	100.63	76.00	100.75

Примечание: 1 – РФА Philips PW-2400, аналитик А.И. Якушев; 2–3 – по данным Beck и Hermann (Ляхович, 1954); 4 – по данным (Ляхович, 1954); 5 – по данным (Жабин, Ляхович, 1994). Н.о. – не определялось

около 250°С.

Иногда на границе зон в кристаллах везувиана содержатся хорошо огащенные включения белого непрозрачного агрегата, размером до 50 мкм. По составу включения отвечают либо везувиану, его формула $Ca_{19.29}Al_{9.17}Mg_{3.25}Fe_{0.07}^{2+}Cr_{0.01}Ti_{0.01}Zn_{0.04}^{12.55}(B_{4.04}□_{0.96})_5[(Si_{17.39}Al_{0.61}O_{68})_{18}O_{68}](Cl_{0.09}(OH)_{9.91})_{10}$, либо гидрогроссуляру с формулой $(Ca_{2.54}Mg_{0.43}Mn_{0.02})_{2.99}(Al_{1.89}Fe_{0.03}^{3+}Cr_{0.01}Ti_{0.01})_{1.94}[Si_{2.62}(O_4H_4)_{0.38}O_{3.00}]O_{10.48}F_{0.07}$. Вероятно, включения представляют собой тонкое срастание этих минералов (рис. 6).

Пирит, пирротин

Пирит и пирротин распространены в виде ксеноморфных выделений размером до 0,5 мм, обычно 200 мкм. Формула пирита $(Fe_{0.98}Ni_{0.01})_{0.99}S_{2.01}$, пирротина $(Fe_{6.83}Ni_{0.04})_{6.87}S_{8.13}$. Образование пирротина и пирита во включениях отражает повышенную активность S в системе и связанное с ней широкое распространение сульфидов во вмещающих породах. В связи с этим, Fe, по-видимому, предпочтительно входит в состав сульфидов, по причине чего силикаты значительно обеднены Fe.

Ахтарандит встречается в виде кристаллов, имеющих форму прямых и обратных

тригонтретраэдров (рис. 7), реже наблюдаются двойники прорастания, параллельные и незакономерные срастания кристаллов. Размер их от долей миллиметра до 9–12 мм, обычно 3–6 мм. Как правило, содержание ахтарандита в породах г. Отдельной составляет около 5%. Распределен ахтарандит неравномерно. Отдельные гнезда, размером до 5 см сложены им на 50–80% от объема. Цвет ахтарандита белесый. Нередко это «фаршированные» кристаллы с массой включений кристаллов зонального зеленого (хром-содержащего) и белого (бесхромового) гроссуляра. В целом, ахтарандит сложен микрозернистыми агрегатами граната, везувиана и минералов типа магнезиального хлорита и/или серпентина с небольшими количествами сфалерита и халькопирита. Рентгенофазовый анализ (дифрактометр ДРОН-3.5; $2\theta = 5 - 120^\circ$) показал, что псевдоморфозы по ахтарандиту на 2/3 сложены гидрогроссуляром с $a_0 = 11.971(2) \text{ \AA}$ и на 1/3 – серпентином и 7 \AA септехлоритом (бертьерином), с незначительной примесью кальцита, кварца, гематита. С этими данными хорошо коррелируют результаты микрозондового анализа ахтарандита Талнаха.

Состав талнахского ахтарандита (табл. 7, ан. 1) близок к составу вилюйского ахтарандита (табл. 7, ан. 2–4); вилюйский несколько богаче Mg и H₂O, талнахский обогащен Ca. Следовательно, вилюйские псевдоморфозы обогащены минералами группы серпентина и хлорита, талнахские – гидрогроссуляром. Содержания микроэлементов в талнахском ахтарандите, по данным рентгено-флуоресцентного анализа, г/т: Cr 417, Ni 73, Co 13, Cu 137, Zn 815, S 1190, F 900, Cl 351, V 22, Sr 14, Ba 36, Y 2, Sc 11, Zr 112, Nb 5, Rb 9. Повышенные концентрации Zr обусловлены обилием гидрогроссуляра, который, по данным В.В. Рябова (Рябов и др., 1996), содержит до 0.7 мас. % ZrO₂ (Плетнев и др., 2001).

Синтез протофазы ахтарандита

Со времени попытки синтеза высокобарического граната как протоминерала ахтарандита (Горохов и др., 1971), которая была основана на позднее опровергнутой гипотезе (Перцев, 1972), учеными проводились сугубо теоретические построения и предположения о возможной протофазе (Чесноков и др., 1993–1996; Galuskin *et al.*, 1995; Galuskina, 1998; Павлушин, 2000).

В 1996 г. в минеральных ассоциациях горелых отвалов Б.В. Чесноков с соавторами

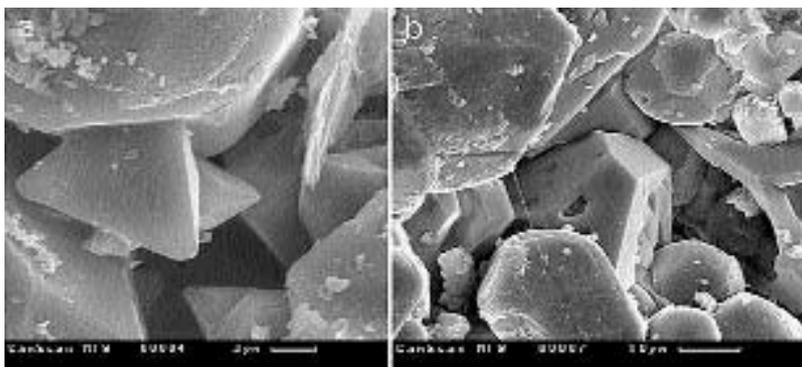
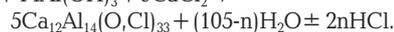
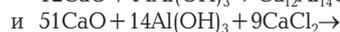
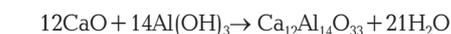


Рис. 8. Изображения синтезированных фаз в обратно-рассеянных электронах:
 а – майенит ($T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=1\text{ кб}$),
 б – хлорсодержащий майенит ($T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=3\text{ кб}$)

обнаружил фумарольные окси- и хлорсодержащие гранатоиды – хлорсодержащий вадалит и хлорсодержащий майенит, форма кристаллов которых отвечает ахтарандиту, и предположил, что это вероятные протофазы ахтарандита (Чесноков, 1996). Майенит был впервые описан в Майене, в горах Эйфель, Германия (Hentschel, 1964), в продушинах лав, что указывает на пневматолитовое происхождение. Это минерал-гранатоид $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, имеющий гранатоподобную структуру (пространственная группа $I-43d$). В природном майените часть O замещена (F-, Cl-, OH-), что сближает его с вадалитом $\text{Ca}_6\text{Al}_5\text{Si}_2\text{O}_{16}\text{Cl}_3$ – изоструктурным хлорсодержащим минералом группы майенита (Glasser, 1995). Между вадалитом и гроссуляром существует структурная связь (Tsukimura *et al.*, 1993), что было доказано позднее экспериментальным путем; при высокотемпературной обработке гидрогроссуляра (гибшита) хлоридным газом происходила реакция с образованием вадалита (Fujita *et al.*, 2001).

В данной работе синтез вероятной протофазы ахтарандита проводился на основе ее генетических и структурных связей с гроссуляром-гидрогроссуляром и предположения о пневматолитовом характере процесса, основанном на литературном и собственном аналитическом материале. Методика получения хлорсодержащих гранатоидов ряда вадалит-майенит базировалась на данных по синтезу гидрогроссуляра (Шведенков и др., 1974). Были поставлены серии опытов по синтезу вероятных протофаз ахтарандита: хлорсодержащего майенита, хлорсодержащего гибшита и хлорсодержащего вадалита и их бесхлорных аналогов. Опыты проводились 14 суток при температуре $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 1 кб и 3 кб. Исходные материалы: CaO, Al_2O_3 или $\text{Al}(\text{OH})_3$, SiO_2 , CaCl₂. Синтез проводился по вероятным реакциям:



Размер кристаллов синтезированных гранатоподобных минералов от долей микрометра до 20 мкм. В их числе – тригонритетраэдрические кристаллы майенита, содержащего от следов до 0,59 мас.% Cl (рис. 8). Состав полученного майенита (мас. %): SiO_2 10,56-11,70, Al_2O_3 45,07-45,62, CaO 43,48-42,8 (Алфорова, 2004).

Происхождение минеральной ассоциации с ахтарандитом

Как отмечалось выше, изученная минерализация на проявлении гроссуляра, везувиана и ахтарандита г. Отдельной (Талнах) и на Вилюйском месторождении гроссуляра, вилюита и ахтарандита являются аналогами. Они описаны в литературе как скарновые (Рябов, 1996; Ляхович, 1954), однако минеральные парагенезисы, данные ИК-спектроскопии, термобарогеохимические и экспериментальные исследования свидетельствуют о более сложном процессе, состоявшем, как минимум, из двух стадий: высокотемпературной скарновой и низкотемпературной апоскарновой.

К высокотемпературной скарновой стадии процесса относятся авгит и перовскит, находящиеся в виде отдельных фаз и в виде включений в центральных частях кристаллов везувиана, а также сами центральные части везувиана.

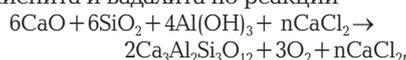
К низкотемпературной стадии относится парагенезис: гроссуляр и гидрогроссуляр с 10 и более мас. % Cr_2O_3 и TiO_2 (Ishimoto *et al.*, 1983), боросодержащий везувиан (краевые части кристаллов), амезит, диопсид, алюмо-содержащий магнезиохромит, титанит, троилит, хлорит, серпентин, являющиеся типичными образованиями пренит-пумпеллиитовой фации низкоградного метаморфизма.

Хорошо ограненные включения агрегатов везувиана, амезита и гидрогроссуляра, встречающиеся в кристаллах гроссуляра и везувиана, напоминают псевдоморфозу, обладающую четкой формой и представляющую собой тонкое срастание минералов, подобную ахтарандиту, находящемуся в данной минеральной ассоциации. Исходя из предположения, что эти включения — суть ахтарандит, можно утверждать, что, будучи капсулированным, протоминерал ахтарандита также претерпел изменения, как и в случае отдельных кристаллов.

Вероятно, процесс формирования специфической минеральной ассоциации был следующим: на скарновой стадии происходило образование высокотемпературных минералов, ядер кристаллов везувиана, протоминерала ахтарандита — хлорсодержащего майенита. На апоскарновой стадии возникли более низкотемпературные образования, в той или иной степени заместившие минералы высокотемпературной стадии: гроссуляр — по плагиоклазу, титансодержащий хром-гроссуляр и алюмо-содержащий магнезиохромит — по первичному хромшпинелиду, низкотемпературный везувиан — по высокотемпературному везувиану, ахтарандит — по хлорсодержащему майениту, титанит — по перовскиту. Завершился процесс образованием гидротермальных прожилков с халькопиритом, троилитом и стильбитом. На Вилюйском месторождении процесс образования подобной минеральной ассоциации, по нашим представлениям, происходил подобным образом: на высокотемпературной, скарновой стадии образовались гроссуляр, вилюит, хлорсодержащий майенит; на низкотемпературной хлорсодержащий майенит заместился ахтарандитом.

По нашему мнению, минерал, который был замещен ахтарандитом, образовался в ходе специфического высокотемпературного скарнового процесса с пневматолитовой составляющей, в котором активно участвовали хлорные флюиды. Предполагаемый протоминерал для ахтарандита — хлорсодержащий майенит из ряда майенит-вадалит соответствует характеру процесса. На пневматолитовый тип процесса указывает следующее: 1 — майенит впервые найден в постмагматических образованиях в лавах, насыщенных флюидами, 2 — похожий по форме на ахтарандит, хлорсодержащий майенит из горелых отвалов Челябинского угольного разреза образован в результате техногенных фумарольных процессов, 3 — синтез хлорсодержащего майенита проводился «сухим» способом, по

окончании опыта в ампулах были зафиксированы остатки газообразного HCl, 4 — образование вадалита из гибшита проводилось путем воздействия на первый газообразными хлорсодержащими фазами (Fujita *et al.*, 2001). Между гроссуляром и прото-ахтарандитом — майенитом существует структурное и химическое родство, благодаря чему многие исследователи считали гроссуляр протоминералом ахтарандита. Первое подтверждается реакцией перехода гибшит-вадалит и изоструктурностью пары вадалит-майенит; на второе указывает получение гроссуляра при синтезе майенита и вадалита по реакции



в которой не участвует заложенный в опыт Cl. Таким образом, возможно, наличие ахтарандита является индикатором локального повышенного содержания Ca в породе, подвергшейся пневматолиту.

В дальнейшем под воздействием поздних низкотемпературных процессов произошел переход хлорсодержащий майенит → вадалит → гидрогроссуляр; первоначальная форма была сохранена. В итоге мы наблюдаем ахтарандит, представленный, главным образом, агрегатом гидрогроссуляра. При том же процессе образовались минеральные ассоциации, содержащие хром- и титан-содержащий гроссуляр и необычный по структурным характеристикам везувиан (г. Отдельная, Талнахский район) и крупные кристаллы гроссуляра и вилюита (проявление в долине р. Вилюй, Якутия).

Благодарности

Автор благодарит за всестороннюю помощь проф. Э.М. Спиридонова, за выполнение микронзондовых анализов — Н.Н. Кононкову, Н.Н. Коротаяеву и А.И. Якушева, за проведение термического анализа — Л.П. Огородову, за проведение ИК спектроскопии и анализ — Е.Ю. Боровикову, за исследования флюидных включений — В.Ю. Прокофьева, за проведение гониометрических измерений — Г.Ф. Анастасенко.

Список литературы

- Алферова М.С. Проблемы синтеза ахтарандита // Тезисы ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии ЕСЭМПГ-2004. 2004. С. 4.
Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Гостеол-

- техиздат, **1959**. 67 с.
- Горохов С.С., Душин-Барковский Р.А., Лисицына Е.Е. Экспериментальное изучение природы ахтарандита // Зап. ВМО. **1971**. Ч. 100. Вып. 4. С. 499–502.
- Жабин А.Г., Ляхович В.В. Третье столетие загадки ахтарандита: новые данные // Минерал. журн. **1994**. Т. 16. № 1. С. 5–15.
- Куражковская В.С., Боровикова Е.Ю., Алферова М.С. Инфракрасные спектры, параметры элементарной ячейки и оптический знак боросодержащих везувианов и виллюитов // Зап. ВМО. **2004**. № 7. С. 25–28.
- Ляхович В.В. Новые данные о минералогии Виллюйского месторождения ахтарандита // Тр. Восточно-Сибирского филиала АН СССР. Сер. геол. **1954**. Вып. 1. С. 85–116.
- Павлушин А.Д. Природа ахтарандита и тригон-тритетраэдрические скелетно-зональные кристаллы граната из ахтарандитсодержащих пород реки Виллюй // Зап. ВМО. **2000**. №5. С. 69–75.
- Перцев Н.Н. О природе ахтарандита (по поводу ст. Горохова С.С. и др., 1971) // Зап. ВМО. **1972**. Ч. 101. вып. 3. С. 381–382.
- Плетнев П.А., Алферова М.С., Спиригонов Э.М. Ахтарандит из района Талнахского месторождения // Зап. ВМО. **2001**. № 5. С. 74–78.
- Плюснина Л.П., Лихойгов Г.Г., Зарайский Г.П. Физико-химические условия формирования родинитов по экспериментальным данным. // Петрология. **1993**. т. 1. № 5. С. 557–568.
- Прокофьев В.Ю., Кугай И.Н. Практическая термобарогеохимия. Современные методы изучения флюидных включений в минералах. М.: ИГЕМ РАН. **1999**. 64 с.
- Рябов В.В., Шевко А.Я., Симонов О.Н. Состав платиноносных высокохромистых скарнов Талнаха (Норильский район) // Геология и геофизика. **1996**. т. 37. № 7. С. 60–75.
- Спиригонов Э.М., Ладыгин В.М., Симонов О.Н., Анастасенко Г.Ф., Степанов В.К. Метавулканы цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фации трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. М.: МГУ, **2000**. 212 с.
- Чесноков Б.В., Виллисов В.А., Баженова Л.Ф., Бушмакин А.Ф., Котляров В.А. Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (сообщение пятое) // Урал. минерал. сборник. № 2. Миасс: **1993**. С. 3–35.
- Чесноков Б.В., Виллисов В.А., Бушмакин А.Ф., Котляров В.А., Белогуб Е.В. Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (сообщение шестое) // Урал. минерал. сборник. № 3. Екатеринбург: **1994**. С. 3–36.
- Чесноков Б.В., Бушмакин А.Ф. Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (сообщение восьмое) // Урал. минерал. сборник. № 5. Миасс: **1995**. С. 3–22.
- Чесноков Б.В., Рочев А.В., Баженова Л.Ф. Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (сообщение девятое) // Урал. минерал. сборник. № 6. Миасс: **1996**. С. 3–25.
- Швегенков Г.Ю., Калинин Д.В. О содержании воды в гидрогроссуляре в зависимости от условий образования // Экспериментальные исследования по минералогии. Новосибирск, **1974**. С. 49–54.
- Allen F.M., Burnham C.W. A comprehensive structure – model for vesuvianite: symmetry valuations and crystal growth // Can. Mineral. **1992**. Vol. 30. № 1. P. 1–18.
- Armburster T., Gnos E. P4/n and P4nc long – range ordering in low – temperature vesuvianites // Am. Mineral. **2000**. Vol. 85. № 3–4. P. 563–569.
- Galuskin E., Galuskina I., Winiarska A. Epitaxy of achtarandite on grossular – the key of the problem of achtarandite // N. Jb. Miner. Mh. **1995**. P. 306–320.
- Galuskina I., Galuskin E., Sitarz M. Atoll hydrogarnets and mechanism of the formation of achtarandite pseudomorphs // Neues Jb. Mineral. Mh. **1998**. H. 2. S. 49-62.
- Glasser F.P. Comments on wadalite, $\text{Ca}_6\text{Al}_5\text{Si}_2\text{O}_{16}\text{Cl}_3$, and the structures of garnet, mayenite and calcium chlorosilicate // Acta Crystallographica. C51. **1995**. P. 340.
- Hentschel G. Mayenit, $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, und Brownmillerit, $2\text{CaO}\cdot(\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_3$, zwei neue Minerale in den Kalksteinschlüssen der Lava des Ettringer Bellerberges // N. Jb. Miner. **1964**. P. 22–29.
- Ishimoto N., Onuki H., Yomogida K. Additional find of Ti-rich hydroandradite in low-grade metamorphic rocks // J. Japan Assoc. Mineral., Petrol., Econ. Geol. **1983**. Vol. 78. N. 3. P. 105–108.
- Fujita S., Suzuki K., Ohkawa M. Reaction of hydrogrosular with hydrogen chloride gas at high temperature. Chem. Mat. **2001**. P. 2523–2527.
- Sack R.O., Ghiorso M.N.S. Chromite as a petrogenetic indicator // Oxide minerals. **1991**. P. 323–353.
- Tsukimura K., Y. Kanasawa, M.Aoki, M.Bunno Structure of wadalite $\text{Ca}_6\text{Al}_5\text{Si}_2\text{O}_{16}\text{Cl}_3$ // Acta