

УДК 549.652

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ СКАПОЛИТА В РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ПЕГМАТИТАХ САНГИЛЕНА

© 2004 г. Л. Г. Кузнецова, Ю. И. Сизых

Представлено академиком Ф.А. Летниковым 14.09.2003 г.

Поступило 03.11.2003 г.

Скаполит известен в основном как минерал метаморфических пород и скарнов. Находки первично-магматического скаполита крайне редки [1, 2]. В нашем сообщении приведены данные о первичном скаполите, впервые обнаруженном в редкометальных пегматитах.

Жильное тело со скаполитом и сподуменом найдено в Сольбельдерском поле редкометальных пегматитов Сангиленского нагорья Тувы – региона, известного месторождениями литиевых пегматитов. Сподуменовые пегматиты в Сольбельдерском поле образуют серии сближенных субпараллельных протяженных жил, приуроченных к линейным зонам тектонических нарушений. Вмещающие породы – в основном слабо метаморфизованные мраморизованные известняки, содержащие битуминозные примеси.

Исключительность данной редкометальной провинции состоит в том, что литиеносные магматические расплавы внедрялись в мощную карбонатную толщу, тогда как подавляющее большинство литиеносных флюидно-магматических систем мира локализуется в алюмосиликатных средах. Редкометальные пегматиты Сангиленского нагорья отличаются низким содержанием летучих (F, H₂O, V) и, как следствие, очень ограниченным проявлением в жильных телах процессов автометасоматоза и прямого экзоконтактового взаимодействия с вмещающими карбонатными породами. Изменения известняков обычно ограничиваются их перекристаллизацией и осветлением не далее первых сантиметров от контактов пегматитовых жил, в редких случаях в еще более узких экзоконтактовых зонах отмечается флюорит, литиевая слюда, кварц. В случае захвата в эндоконтактовой зоне пегматитовых жил неболь-

ших остроугольных ксенолитов вмещающих пород последние сохраняют свои очертания и минеральный состав, меняется только их структура за счет перекристаллизации и укрупнения зерен кальцита.

Несмотря на отсутствие следов существенного взаимодействия литиеносных расплавов с известково-карбонатными породами в момент внедрения и становления жил, все сподуменовые пегматиты этой провинции характеризуются очевидными признаками контаминации известково-карбонатным субстратом, проявляющимися в специфических особенностях их минерального и химического составов, при сохранении общей Ta–Li-геохимической специализации. По сравнению со сподуменовыми пегматитами, залегающими в алюмосиликатных породах, они обогащены Ca, Sr, CO₂ и обеднены Na (табл. 1). В них сохраняется обычный для пегматитов этого типа набор главных породообразующих минералов (кварц, калиевый полевой шпат, кислый плагиоклаз, сподумен), но наблюдается увеличение роли калишпата за счет плагиоклаза, который становится более кальциевым (альбит–олигоклаз, олигоклаз); наряду со сподуменом развиты в небольших количествах первично-магматические Fe–Li-слюды, кальцит, а также акцессорные Ca-содержащие минералы Ta, Nb, Be.

Редкометальная пегматитовая жила со скаполитом обнаружена в жильной серии среди обычных сподуменовых пегматитов, залегающих в известняках. Пространственной связи с какими-либо другими магматическими породами для нее не выявлено. Как и остальные сподуменовые жилы данного региона, она имеет все признаки инъекционного образования (четкие и резкие контакты с вмещающими известняками, слабо выраженные околожильные изменения). Мощность жилы 1.5–2 м, строение – зональное. Приконтактовая оторочка шириной 3–8 см сложена тонко-мелкозернистым кварц-скаполитовым минеральным комплексом со сподуменом, турмалином и мусковитом гипидиоморфнозернистой структуры; в центре жилы – средне-крупнозернистый кварц-скаполитовый минеральный комплекс со сподуменом,

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск*

*Институт земной коры
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск*

Таблица 1. Химический состав сподуменовых гранитоидов, а также пегматитов с первично-магматическим скаполитом, локализованных в карбонатных и алюмосиликатных вмещающих породах

Компонент	1	2	3 (4)	4 (3)	5 (1)	6 (2)	7 (1)
SiO ₂	72.25	74.10	72.96	74.40	72.96	74.90	71.20
TiO ₂	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0.00	0.16
Al ₂ O ₃	16.20	15.80	16.58	14.94	15.35	13.30	14.97
Fe ₂ O ₃	0.30	0.08	0.65	0.51	0.21	0.22	1.77
FeO	0.71	0.65	0.52	0.27	0.54	0.62	–
MnO	0.04	0.06	0.11	0.07	0.03	0.02	0.02
MgO	0.04	0.03	0.04	0.02	0.13	0.13	0.81
CaO	0.25	0.20	0.19	0.38	1.10	7.15	3.19
K ₂ O	2.87	1.30	2.23	3.69	3.96	0.38	5.74
Na ₂ O	5.02	6.30	4.35	3.64	2.73	1.43	1.43
P ₂ O ₅	0.20	0.17	0.05	0.01	0.04	0.00	0.02
Li ₂ O	0.75	0.82	1.43	1.25	1.56	0.18	0.00
H ₂ O [±]	0.60	0.60	0.51	0.54	0.70	0.80	0.37
CO ₂	Н.д.	Н.д.	0.11	0.29	0.40	2.27	Н.д.
F	0.06	0.09	0.23	0.04	0.01	0.03	»
Сумма	99.30	100.22	99.77	100.06	99.76	101.43	99.68
Редкие элементы							
B	Н.д.	Н.д.	65	9	35	520	5000
Be	140	180	9	20	15	230	4
Sn	Н.д.	400	140	300	330	1500	< 1
Ba	»	Н.д.	28	65	45	55	2418
Sr	»	»	51	70	260	1600	Н.д.
Минеральный состав (модальный), %							
Qz	25.06	26.73	28.42	31.53	26.68	50.86	36.25–36.32
Or	13.85	4.03	6.20	16.27	24.19	–	36.11–35.94
Ab	42.08	52.55	36.42	30.08	24.02	–	2.88–2.32
An	1.28	0.70	1.02	1.95	1.68	–	10.25–10.14
Scap	–	–	–	–	–	41.42	2.82–3.61
Spod	6.71	7.22	14.45	10.21	19.84	3.62	–
Musc	6.57	6.60	12.13	9.70	–	3.09	–
Turm	2.47	0.46	1.12	–	–	1.40	11.68–11.67
Gran	2.00	1.72	0.23	0.25	2.05	–	–

Примечание. 1 – сподуменовые граниты Алахинского массива [3]; 2 – средний состав сподуменовых редкометальных пегматитов мира [3]; 3–5 – сподуменовые пегматиты трех разных участков одного из полей Тувы (3 – залегающие в слюдяных сланцах, 4, 5 – залегающие в известняках); 6 – редкометальный скаполитовый пегматит (Тува); 7 – нередкометальный гранитный пегматит со скаполитом (Юж. Каролина) [2]. Модальный минеральный состав рассчитан из данных химического состава пород и слагающих их минералов методом баланса масс по программе, изложенной в [4]. Оксиды – мас. %, редкие элементы – г/т. В скобках – число проб. Н. д. – нет данных.

турмалином, мусковитом и единичными блоками микроклина гипидиоморфнозернистой, местами порфириобластовой структуры. Среди этих пород наблюдаются небольшие гнезда мелкозернистого кварц-мусковитового минерального комплекса. Акцессорные минералы – касситерит, пироклор и, в меньшей степени, циркон и пирит. Вмещающие

битуминозные известняки перекристаллизованы на расстоянии до 0.5 м от жилы, но экзоконтактовая минерализация – кварц, турмалин, скаполит – локализована не далее 0.05 м от ее контактов.

Химический состав мелко-среднезернистого скаполитсодержащего пегматита, слагающего основную часть жилы (табл. 2, пробы 298, 496),

Таблица 2. Состав редкометалльного пегматита со скаполитом и вмещающих известняков

Компонент	Проба Тс-527	Проба Тс-498	Проба Тс-294	Проба Тс-297	Проба Тс-298	Проба Тс-496
SiO ₂	2.41	2.16	12.00	66.60	75.28	74.51
TiO ₂	0.03	0.06	0.06	0.03	0.00	<0.02
Al ₂ O ₃	0.48	0.70	2.84	15.80	13.92	12.68
Fe ₂ O ₃	0.30*	0.50*	0.36*	0.31	0.29	0.14
FeO				0.36	0.19	1.04
MnO	<0.03	<0.03	0.03	<0.03	<0.03	<0.03
MgO	0.60	0.34	0.46	0.18	0.10	0.16
CaO	53.12	52.07	46.00	9.36	7.20	7.10
K ₂ O	0.10	0.17	0.06	1.21	0.48	0.29
Na ₂ O	0.04	0.01	0.22	1.77	1.51	1.35
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.06	0.02	<0.02	<0.02
B ₂ O ₃	0.00	0.02	0.62	0.46	0.24	0.20
F	0.04	0.04	0.07	0.04	0.02	0.04
H ₂ O [±]	0.20	3.19	1.45	1.36	0.86	0.73
CO ₂	42.69	40.47	35.86	3.40	2.38	2.16
Сумма (-F=O)	100.03	99.75	100.06	100.89	102.48	100.40
Li ₂ O	<6	140	780	2400	1800	1800
Rb ₂ O	2	3	38	830	274	150
Cs ₂ O	<2	<2	8	180	64	34
Sn	3	5	Н.д.	Н.д.	100	3162
Be	0.3	0.3	»	»	400	50
Ba	60	230	»	»	60	50
Sr	1900	4900	»	»	1700	1500

Примечание. Проба Тс-527 – неизменные известняки на значительном удалении от жилы (>100 м); Тс-498 – перекристаллизованные битуминозные известняки в 0.5 м от жилы; Тс-294 – известняки в зоне интенсивного экзоконтактового метасоматоза в 0.05–0.1 м от контакта жилы; Тс-297 – мелкозернистый кварц-скаполитовый с турмалином и сподуменом минеральный комплекс эндоконтактной зоны мощностью 0.07 м; мелко-среднезернистый кварц-скаполитовый с турмалином и сподуменом минеральный комплекс из центральной зоны; Тс-298 в 0.2 м от контакта, Тс-496 – в 0.5 м от контакта. Звездочкой отмечено общее железо.

по содержанию Si, Al, фемических элементов (Fe, Mg) соответствует лейкограниту, но крайне необычен по низкому содержанию щелочных элементов ($\sum K_2O + Na_2O < 2$ мас. %) и экстремально высокому Ca (7 мас. % CaO). В нем довольно много CO₂, H₂O, B, но мало Cl (0.03–0.04 мас. %), S (0.02 мас. %) и F (0.02–0.04 мас. %). Он характеризуется высокими концентрациями, с одной стороны, Li, Rb, Cs, Sn, Be – литофильных редких элементов, специфичных для сподуменовых пегматитов, с другой – обычно не свойственных им Sr, REE (La 42 г/т, Ce 53 г/т, Nd 23 г/т). Пегматит краевой фации по сравнению с центральной несколько обогащен Al, Ca, K, Na, Li, Rb, Cs, B, H₂O, CO₂ и обеднен кремнеземом (табл. 2, пр. 297). Экзоконтактовый метасоматит в зоне 0.1 м от контакта по сравнению с неизменными известняками обогащен Si, Al, Na, Li, Rb, Cs, B, H₂O и обед-

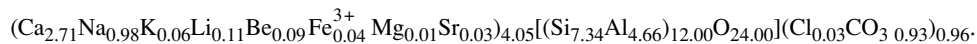
нен Ca и CO₂. Исходя из геохимических данных, можно предположить, что между этими зонами происходил взаимообмен веществом. В то же время масштабы экзоконтактовых метасоматических изменений известняков слишком незначительны, чтобы обусловить привнос Ca и CO₂ в пегматитовую жилу во всем ее объеме. Обогащение пегматита в эндоконтактной зоне по сравнению с центральной Ca, щелочами и Al при снижении содержаний Si могло произойти на магматической стадии формирования расплавов в связи с явлением отраженной щелочности при взаимодействии расплава с известковыми вмещающими породами. На постмагматической стадии осуществлялся частичный вынос (инфильтрация) во вмещающие породы летучих, редких литофильных элементов, Si и Al.

Скаполит в эндоконтактной зоне пегматитовой жилы представлен мелкими (0.3–0.7 см),

Таблица 3. Состав первичных скаполитов из магматических пород кислого состава

Компонент	Скаполит из редкометалльного пегматита Тувы (данные авторов)			Скаполит из латитов Аризоны [1] (22**)	Скаполит из пегматита Ю. Каролины [2] (10**)
	желтый (1*)	зеленый (22**)	желтый (16**)		
		Сред. ± ст.от.	Сред. ± ст.от.	Сред. ± ст.от.	Сред. ± ст.от.
SiO ₂	47.32	47.85 ± 0.39	47.87 ± 0.19	47.60 ± 0.35	46.54 ± 0.24
Al ₂ O ₃	25.54	25.88 ± 0.36	25.34 ± 0.23	24.95 ± 0.33	31.69 ± 0.46
FeO	0.31			0.36 ± 0.03	
MnO				0.01 ± 0.03	0.02 ± 0.03
MgO	0.06			0.07 ± 0.01	<0.01
CaO	16.31	16.38 ± 0.23	16.65 ± 0.14	16.00 ± 0.23	16.46 ± 0.15
Na ₂ O	3.27	3.00 ± 0.42	3.29 ± 0.41	3.95 ± 0.12	3.98 ± 0.07
K ₂ O	0.31	0.12 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.15 ± 0.02
H ₂ O [±]	1.47	1.16*	1.47*		
F	0.01			0.13 ± 0.09	
Cl	0.10	0.11 ± 0.03	0.08 ± 0.04	0.08 ± 0.02	0.21 ± 0.01
SO ₃	0.01	0.00	0.00	4.35 ± 0.11	3.24 ± 0.13
CO ₂	4.17*	4.39*	4.17*	1.75***	
SrO	0.29	0.28 ± 0.02	0.29 ± 0.02	0.55 ± 0.06	
BeO	0.23				
Li ₂ O	0.18				
Сумма	99.65	99.10 ± 0.54	99.25 ± 0.34	100.00	96.40

Примечание. По данным силикатного анализа формульный состав скаполита из редкометалльного пегматита Тувы (рассчитанный на 12(Si + Al)):



В круглых скобках – число проб; * данные силикатного анализа; ** средние статистические данные по результатам анализа на рентгеновском микроанализаторе (для образцов из Тувы анализы выполнены на приборе “Superprobe-733” в Институте геохимии СО РАН; *** по данным [1] CO₂ рассчитано, как нехватка к сумме в 100%.

беспорядочно ориентированными, коротко-призматическими идиоморфными зернами светло-зеленого цвета; в центральной зоне размер кристаллов скаполита увеличивается (1.5–3.0 см), они сохраняют коротко-призматический габитус, но имеют светло-желтую окраску. Вместе с ксеноморфными образованиями кварца они составляют основной каркас – “матрицу” породы. И в центре, и в зальбандах жилы скаполит имеет одинаковый и совершенно однородный химический состав, соответствующий миццониту (73–74% Me) с 1.16–1.47% H₂O и 4.17–4.39% CO₂ в анионной части (табл. 3). В его зернах не проявлена зональность и лишь изредка присутствуют включения циркона, пироклора, турмалина, очевидно, захваченные при его кристаллизации из расплава. С изменением окраски скаполита коррелируют только слабые различия в соотношении летучих: CO₂/H₂O в зеленом скаполите краевой зоны выше, чем в желтом.

Большинство минералов, ассоциирующих со скаполитом в данной жиле, имеет необычный состав. Турмалин, согласно данным силикатного анализа и исследованиям на рентгеновском мик-

роанализаторе, относится к уникальной разновидности – литиевому дравит-увиту. Он представлен длинно-призматическими (0.3–1.0 см) идиоморфными кристаллами медово-желтого цвета, образующими вроски в скаполите, сподумене, калишпате. Коротко-призматические идиоморфные зерна сподумена светло-серого цвета размером до 0.5 см равномерно распределены в породе. Они резорбированы, но не имеют признаков замещения. Химический состав сподумена стандартный для редкометалльных гранитных пегматитов. Калишпат светло-серого цвета образует порфиновые выделения размером 4–5 см среди кварц-скаполитовой матрицы. Он характеризуется повышенными содержаниями Rb (8440 г/т), Cs (642 г/т) и одновременно Sr (2790 г/т). Мусковит – бесцветный, мелкочешуйчатый – неравномерно распространен в породе, образуя небольшие скопления. Так же, как и калишпат, он содержит много Rb (7890 г/т), Cs (1980 г/т), но содержания Li и F в нем понижены. Вероятно, мусковит развивался по калишпату. Из аксессуарных минералов наиболее распространены касситерит и пиро-

хлор. Сростки зерен к а с с и т е р и т а (дипирамидальной формы темно-розовых в центре и светло-розовых по краям) ассоциируют в основном со скоплениями мусковита. П и р о х л о р представлен кристаллами октаэдрической формы розовато-желтого цвета, образующими вросстки в основных породообразующих минералах (скаполите, сподумене). Особенностью его состава являются повышенные концентрации Ti, U, Th, Y, а также Nb, Ta ($Nb \gg Ta$), Sn, F при низких содержаниях Na и H₂O. Ц и р к о н встречается значительно реже, образуя вросстки в скаполите, и характеризуется лишь примесью Hf.

Судя по взаимоотношениям минералов, раньше других из расплава кристаллизовался циркон, затем турмалин и пироксид, после них скаполит, сподумен, калишпат и кварц. Мусковит и касситерит, по-видимому, кристаллизовались в основном на постмагматическом этапе. Таким образом, скаполит и сподумен принадлежат к одной парагенетической минеральной ассоциации.

Совместная кристаллизация из расплава сподумена и скаполита – безусловно следствие необычной физико-химической обстановки. По данным экспериментальных работ [5] и исследователей магматических скаполитсодержащих пород [1, 2], кальциевый скаполит может кристаллизоваться в магматических условиях при температурах $\geq 850^\circ\text{C}$ и давлении 3–6 кбар, а также высоком парциальном давлении CO₂ и/или SO₂. Литиевые пегматиты Тувы относятся к наиболее высокобарическому сподуменовому типу редкометалльных пегматитов [6–8]. Согласно результатам исследования расплавных и газовой-жидких включений в сподумене из пегматитов этого типа [9], сподумен в них кристаллизовался из флюидизированного магматического расплава (концентрация летучих составляла: H₂O 1.5 мас. %, CO₂ 0.7 мас. %, Cl 0.04 мас. %), начиная с температур 650–630°C при давлении 4.8–4.6 кбар. По данным этих авторов, уже на начальном этапе кристаллизации сподумена в расплаве присутствует избыточная флюидная фаза, что обусловлено достаточно высокой концентрацией углекислоты, способствующей частичной дегидратации богатого литием расплава, а также повышающей начальную температуру его кристаллизации [9]. Судя по нашим данным, в отдельной порции гранитной магмы, из которой сформировалась изученная пегматитовая жила, парциальное давление углекислоты могло быть еще больше, что способствовало возрастанию начальной температуры кристаллизации расплава (особенно с учетом его кремнекислого и низкощелочного составов). Это сделало возможным совместную кристаллизацию сподумена и скаполита в магматических условиях.

Генетическая связь скаполитового пегматита со сподуменовыми гранитоидами прослеживается по

многим геохимическим показателям: наличие в парагенезисе со скаполитом сподумена, тантало-ниобатов, высокие концентрации типоморфных литофильных редких элементов. Источником повышенных концентраций CO₂ во всех редкометалльных пегматитах Сангилена, в том числе – в пегматитовой жиле со скаполитом, безусловно является толща карбонатных пород. Валовое содержание CO₂ в различных минеральных комплексах обычных сподуменовых жил (без скаполита), независимо от близости к контактам, колеблется от 0.11 до 1.06 мас. %, а в жиле со скаполитом достигает 2.16–3.40 мас. %. Прямо пропорционально CO₂ изменяется содержание CaO – от 0.19 до 2.00 мас. % в сподуменовых минеральных комплексах без скаполита и от 7.10 до 9.36 мас. % в скаполитовом пегматите. Так как при внедрении и становлении пегматитовых жил их химическое взаимодействие с карбонатными породами, как уже отмечалось, было крайне ограничено, предполагается, что контаминация магмы известково-карбонатным материалом происходила в глубинных очагах (или в момент подъема к поверхности под большим давлением). Наблюдаются признаки гетерогенности исходной редкометалльной магмы в отношении летучих: в разных жильных сериях сподуменовые гранитоиды одной фациальной разновидности (наиболее близко соответствующие, на наш взгляд, исходной магме – табл. 1, обр. 3, 4, 5) характеризуются неодинаковыми уровнем содержания и соотношением летучих – особенно CO₂/H₂O, и это отражается на особенностях их минерального состава (соотношении полевых минералов, появлении Са-содержащих минералов). Однако пород со скаполитом, переходных к тем, что целиком слагают изученную нами жилу, среди них пока не выявлено.

Таким образом, сподуменовые пегматиты Сангилена формировались из расплавов со специфическим флюидным режимом (повышенная активность CO₂), гетерогенных как в отношении летучих, так и петрогенных элементов. Пегматитовая редкометалльная жила со скаполитом является хоть и особенным, но вполне закономерным отражением этой специфики. Она имеет все признаки магматического происхождения и является продуктом взаимодействия карбонатных пород и редкометалльной гранитной магмы в необычной физико-химической обстановке. В результате в этом пегматите сочетаются высокие содержания Li, Rb, Cs, Ta, Nb, Sn – элементов, определяющих геохимическую специфику данного типа редкометалльных гранитоидов – и обычно антогонистичных им Ca, Sr, REE.

Авторы признательны Л.Н. Матвеевой, Г.А. Погудиной, Е.В. Смирновой, Т.Н. Крыловой и Л.А. Павловой за подготовку и осуществление аналитических работ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 02-05-64936).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goff F., Arney B.H., Eddy A.C.* // Earth and Planet. Sci. Lett. 1982. V. 60. P. 86–92.
2. *Mittwede St.K.* // Can. Miner. 1994. V. 32. P. 617–622.
3. *Бескин С.М., Марин Ю.Б., Матиас В.В. и др.* // Зап. ВМО. 1999. Ч. 128. № 6. С. 28–40.
4. *Перетяжко И.С.* // Зап. ВМО. 1996. № 3. С. 140–148.
5. *Millhollen G.L.* // Amer. Miner. 1974. V. 59. P. 618–620.
6. *London D.* // Amer. Miner. 1984. V. 69. № 11/12. P. 995–1104.
7. *Гордиенко В.В.* Гранитные пегматиты. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. 271 с.
8. *Загорский В.Е., Макагон В.М., Шмакин Б.М. и др.* Редкометальные пегматиты. Гранитные пегматиты. Новосибирск: Наука, 1997. Т. 2. 281 с.
9. *Загорский В.Е., Прокофьев В.Ю., Кузьмина Т.М.* // ДАН. 1992. Т. 325. № 2. С. 354–356.