

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 549.642.27+552.322.2

И.Ю. Анникова, А.Г. Владимиров, С.З. Смирнов, А.Н. Уваров, И.Ф. Гертнер, О.А. Гаврюшкина

ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ СПОДУМЕНОВЫХ ПЕГМАТИТОВ ГОРНОЙ ШОРИИ

Работа выполнена при финансовой поддержке партнерских интеграционных проектов СО РАН № 77, 123, ОНЗ 10.3 и проекта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2012–2013 гг.» (№ 2012-1.2.1-12-000-2008-8340).

Редкометалльные сподуменовые пегматиты с Li и Ta-Nb минерализацией входят в состав Ташелгино-Майзасского железорудного поля (Горная Шория). Возраст сподуменовых пегматитов – 407 ± 13 млн лет (U-Pb), возраст наложенных динамометаморфических процессов – $310 \pm 2,6$ млн лет (Ar-Ar). Минералами-концентраторами лития являются: сподумен – $6,24 \pm 0,46$ мас. % Li_2O , мусковит – $0,25 \pm 0,04$ мас. % Li_2O и калиевый полевой шпат – $0,003 \pm 0,001$ мас. % Li_2O . Деформированность кристаллов сподумена, полевых шпатов и мусковита, обтекание мелкозернистым агрегатом кварца зерен сподумена и полевых шпатов, а также наличие S-образных кристаллов сподумена свидетельствуют о влиянии процессов динамометаморфизма и синкинематической природе пегматитов. Взаимодействие с вмещающими мраморами проявилось на завершающем этапе становления пегматитов, что отразилось в наличии зон высококальциевого граната и замещении оксидов Ta, Nb и Ti кальцийсодержащими минералами – Са-микролитом и титанитом. Макро- и микроминеральный состав сподуменовых пегматитов Ташелгинского рудного поля позволяет рассматривать их как перспективный источник литиевых руд при условии подготовки цемента из кварц-полевошпатовых хвостов горно-обогатительного процесса.

Ключевые слова: сподуменовые пегматиты; пегматитовые жилы; микроминеральные включения; акцессорный парагенезис; изотопное датирование; горно-обогатительные процессы.

Геологическое строение пегматитового поля. Ташелгинское (Мраморное) пегматитовое поле расположено в Горной Шории в 40 км к югу от г. Междуреченска Кемеровской области. Пегматитовое поле является частью Ташелгинско-Майзасского рудного узла, приуроченного к зоне Кузнецко-Алатаусского глубинного разлома [1, 2]. Вмещающие породы представлены амфиболитами и мраморами. Метаморфические породы прорваны небольшими интрузивами кислого состава – гранито-гнейсами и гнейсо-гранитами томского комплекса пермо-триасового возраста (251–236 млн лет) и субщелочными гранит-лейкогранитами порожинского комплекса триасового возраста (211 млн лет) [1, 3]. В состав Ташелгинского рудного поля входят олигоклаз-микроклиновые пегматиты с биотитом, микроклин-альбитовые пегматиты с мусковитом и микроклин-альбитовые пегматиты со сподуменом. Сподуменовые пегматиты приурочены к мраморам ташелгинского метаморфического комплекса. В коренном залегании были вскрыты пять пегматитовых жил, имеющих промышленное значение: Юрьевская, Юбилейная, Ляпуновская, Николаевская и Родченковская (см. рис. 1). Средние параметры этих жил: протяженность – до 200 м, мощность – 0,8–1,2 м [4, 5].

Жила Юрьевская вскрыта на 100 м по простиранию разведочной траншеей в левом борту р. Ташелга. Мощность жилы варьирует от 0,4 до 1,4 м, азимут простирания – от 210° до 230° , азимут падения составляет 70° – 85° . Пегматиты жилы Юрьевская представляют собой лейкократовые грубозернистые породы, минеральный состав которых при полевых наблюдениях диагностируется как кварц-полевошпат-сподуменовый с подчиненным количеством мусковита. Сподумен образует удлиненные крупные (до 30 см) голубовато-зеленые и серо-зеленые идиоморфные зерна с характерным шелковистым отливом и не обнаруживает сле-

дов вторичного изменения. Светло-серый крупнокристаллический калишпат визуально неотличим от плагиоклаза. Серый до темно-серого непрозрачный кварц, как правило, заполняет межзерновое пространство. Среди акцессорных минералов макроскопически диагностируются только бурый гранат и идиоморфный пирит, нередко подвергнутый вторичным изменениям.

Наиболее характерными особенностями текстурно-структурного облика пегматитовой жилы Юрьевская являются отчетливая зональность, наличие директивных текстур, обусловленных субпараллельной ориентировкой кристаллов калишпата и сподумена, а также присутствие S-образных кристаллов сподумена (см. рис. 2). В строении жилы отчетливо выделяются три зоны: 1) маломощная (5–7 см) приконтактная оторочка, сложенная темно-серым мелкозернистым агрегатом; 2) кварц-полевошпатовая зона с грубозернистой пегматоидной структурой, характеризующаяся значительным содержанием сподумена и постоянным присутствием мусковита; 3) зоны блокового микроклина и кварца, приуроченные к осевой части жилы, распространенные только в отдельных частях жилы и представляющие собой практически мономинеральные обособления.

Возраст. По данным U-Pb изотопного датирования магматогенного циркона из жилы Юрьевская методом SHRIMP II, возраст сподуменовых микроклин-альбитовых пегматитов Ташелгинского поля составляет 407 ± 13 млн лет. Было также проведено Ar-Ar изотопное датирование мусковита из сподуменовых и безсподуменовых пегматитов Ташелгинского месторождения. Для датирования были выделены монофракции мусковита из сподумен-микроклин-альбитового крупнозернистого комплекса жилы Юрьевская и из кварц-мусковит-калишпат-гранатового грубозернистого комплекса безсподуменовых пегматитов. Возраст мусковита из сподуменового пегматита составляет

310±2,6 млн лет, из бесподуменного пегматита – 307±2,6 млн лет. Полученные данные можно интерпретировать как возраст наложенных на пегматиты динамометаморфических процессов.

Возраст пегматитов показывает, что несмотря на широкий разброс значений, полученных U-Pb и Ar-Ar методами, пегматиты образовались как минимум на 100 млн лет раньше присутствующих в регионе гранитов. Таким образом, сподуменные пегматиты Ташелгинского рудного поля относятся к объектам, для которых генетическая связь с гранитоидным магматизмом не устанавливается.

Микроструктуры пегматитов. Петрографические исследования приконтактной оторочки жилы Юрьевская позволили установить, что она сложена мелкозернистым агрегатом кварца, биотита и плагиоклаза с подчиненным количеством мусковита, калиевого полевого шпата и граната. Чешуйки биотита и мусковита ориентированы субпараллельно контакту жилы. Для микроструктуры кварц-полевошпатовой зоны жилы Юрьевская характерны деформация, раздробленность и выкрошенность крупных зерен сподумена и калишпата, обтекание их мелкозернистым агрегатом кварца и мусковита. Кварц в этом агрегате представлен ксеноморфными удлинёнными зёрнами с зазубренными краями, плотно прилегающими друг к другу. В поляризованном свете зёрна кварца обладают мозаичным погасанием. Кристаллы мусковита в поперечном сечении имеют размеры от десятков микрон до 3 сантиметров и нередко изогнуты.

Микроскопически отчетливо выделяются две генерации сподумена: сподумен-I – идиоморфный, иногда со сглаженными краями кристаллов, нередко изогнутыми и разорванными, и сподумен-II, образующий зернистые и радиально-лучистые агрегаты вокруг кристаллов сподумена-I либо полностью их покрывающие. Калиевый полевой шпат и плагиоклаз идиоморфны и представлены в породе примерно в одинаковом количественном соотношении. Калиевый полевой шпат образует кристаллы размером до 5 см по удлинению, плагиоклаз – от десятых долей миллиметра до первых миллиметров.

Породообразующие минералы. Учитывая гигантозернистость породы, статистически достоверная оценка минерального состава сподуменных пегматитов жилы Юрьевская определялась путем исследования большеобъемной (около 300 кг) пробы. Методом рентгенофазового анализа определено следующее количественное соотношение породообразующих минералов в сподуменных пегматитах жилы Юрьевская: плагиоклаз (альбит) – 25–30%, сподумен – 18–22%, кварц – 15–20%, калиевый полевой шпат (микроклин) – 15–20%, мусковит – 10–13%.

При изучении составов породообразующих и акцессорных минералов сподуменных пегматитов авторами статьи в рассмотрение были взяты и бесподуменные мусковитовые микроклин-альбитовые пегматиты Ташелгинского поля. Содержания главных компонентов в минералах определялись методом рентгеноспектрального микроанализа (EMPA и EDS), редких элементов, воды и фтора – методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS и TOF-SIMS), лития в сподумене – методом атомной абсорбции (INAA).

Полевые шпаты в сподуменных пегматитах представлены альбитом (98,9% альбитового минала) и ортоклазом (95,5% ортоклазового минала), причем подавляющее большинство исследованных макроскопически неразличимых полевых шпатов в сподуменных пегматитах оказались калиевыми полевыми шпатами (табл. 1). Уровни концентрации элементов-примесей в них варьируют в следующих пределах: FeO – 0,00–0,06 мас.%, MnO – 0,00–0,01 мас.%, CaO – 0,00–0,02 мас.%, Na₂O – 0,25–0,76 мас.%, Li – 16,4–39,3 г/т, Rb – 5959–9765 г/т, Cs – 420,6–1763 г/т, B – 1,52–2,03 г/т, P₂O₅ – 0,00–0,39 мас.% (табл. 1). В плагиоклазах, представленных альбитом, содержание FeO оказалось ниже предела обнаружения, MnO – 0,00–0,01 мас.%, CaO – 0,09–0,14 мас.%, K₂O – 0,06–0,11 мас.%, Li – 3,58 г/т, Rb – 495,6 г/т, Cs – 66,4 г/т, B – 3,42 г/т, P₂O₅ – 0,00–0,01 г/т (см. табл. 1). Кристаллохимические формулы полевых шпатов, рассчитанные кислородным методом на 8 атомов кислорода, для калиевого полевого шпата – (K_{0.88–0.91}, Na_{0.02–0.07}, Rb_{0.02–0.03}, Li_{0.0–0.01}) [Al_{0.98–1.0}Si_{2.98–3.02}O₈], для альбита – (Na_{0.84–0.89}, Ca_{0.01}) [Al_{0.99–1.01}Si_{3.02–3.04}O₈]. Составы полевых шпатов из бесподуменных мусковитовых пегматитов Ташелгинского поля характеризуются более низкими, чем в полевых шпатах из сподуменных пегматитов уровнями концентрации Cs и Rb.

Слюда в сподуменных пегматитах Ташелгинского рудного поля по составу отвечает мусковитам (см. рис. 3). Вариации содержаний главных компонентов и элементов-примесей в мусковитах из сподуменных пегматитов составляют: TiO₂ – 0,04–0,12 мас.%, MgO – 0,19–0,51 мас.%, FeO – 1,94–3,80 мас.%, MnO – 0,14–0,31 мас.%, Na₂O – 0,10–0,44 мас.%, Li₂O – 0,19–0,31 мас.%, Rb₂O – 0,63–1,08 мас.%, Cs₂O – 0,04–1,37 мас.%, F – 0,30–1,01 мас.%, H₂O – 3,73–5,11 мас.%. Кристаллохимическая формула мусковита, рассчитанная кислородным методом на 11 атомов кислорода, – (K_{0.75–0.88}, Na_{0.0–0.06}, Rb_{0.03–0.05}, Cs_{0.0–0.01}) (Al_{1.79–2.01}, Fe_{0.10–0.22}, Mg_{0.02–0.05}, Mn_{0.01–0.02}, Li_{0.05–0.09}) × [Al_{0.84–1.03}Si_{2.97–3.16}O₁₀] (OH_{1.78–1.93}, F_{0.07–0.22}). Составы мусковитов в бесподуменных пегматитах отличаются более низкими, чем в сподуменных пегматитах, содержаниями фтора, а также Cs₂O.

Сподумен Ташелгинского поля отличается следующими вариациями уровней концентрации главных компонентов и элементов-примесей: SiO₂ – 65,44–66,29 мас.%, Al₂O₃ – 27,02–27,76 мас.%, FeO – 0,30–0,63 мас.%, MnO – 0,07–0,15 мас.%, CaO – 0,00–0,01 мас.%, Na₂O – 0,10–0,21 мас.%, K₂O – 0,00–0,10 мас.%, Li₂O – 5,54–7,40 мас.%, Rb – 0,06–106,85 г/т, Cs – 0,63–27,99 г/т, H₂O – 0,04–2,82 мас.% (табл. 2). Кристаллохимическая формула сподумена рассчитывалась несколькими способами: кислородным на 6 атомов кислорода и катионным в двух вариантах – на 1 катион алюминия и на 2 катиона кремния. Наиболее оптимальным оказался расчёт кристаллохимических коэффициентов на 1 атом алюминия, показавший, что состав сподумена близок к идеальной формуле – LiAlSi₂O₆. Главными элементами-примесями являются Fe и Mn, при этом, если считать, что Fe и Mn, как и для большинства пироксенов, входят в позицию M2, занятую алюминием, тогда сумма положительных зарядов оказывается больше, чем отрицательных – 12,02 и 12,00 соответственно, т.е. не соблюдается баланс зарядов. Если же Fe и Mn изоморфно

заместят литий в позиции М1, тогда суммарный заряд катионов составляет 12,00, т.е. баланс зарядов соблюдается.

Таким образом, можно заключить, что схема изоморфного замещения в сподумене Ташелгинского поля выгля-

дит следующим образом: $2\text{Li}^+ = \text{Fe}^{2+} + \square$, $2\text{Li}^+ = \text{Mn}^{2+} + \square$, тогда формула сподумена из расчёта на 1 атом алюминия – $(\text{Li}_{0.69-0.91}, \text{Fe}_{0.01-0.02}, \text{Na}_{0.006-0.012}, \text{Mn}_{0.002-0.004}, \text{K}_{0-0.004}) \text{Al}[\text{Si}_{2.01-2.06}\text{O}_6]$.

Т а б л и ц а 1

Составы полевых шпатов из сподуменовых пегматитов Ташелгинского поля

Компонент	Калиевые полевые шпаты														Плаггиоклазы		
SiO ₂	65.32	65.03	64.20	65.27	64.90	64.64	65.05	64.86	64.70	64.46	64.72	65.16	64.39	64.21	69.26	69.45	69.66
Al ₂ O ₃	18.25	18.10	18.17	18.00	18.36	18.25	18.03	18.20	18.33	18.14	18.03	18.01	18.37	18.32	19.29	19.64	19.27
FeO	0.02	0.01	0.00	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
CaO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.09	0.14	0.12
Na ₂ O	0.50	0.41	0.25	0.35	0.33	0.37	0.38	0.39	0.48	0.76	0.73	0.54	0.53	0.56	9.82	10.60	10.58
K ₂ O	15.10	15.33	15.21	15.17	14.92	15.38	15.18	15.31	14.86	14.99	14.94	15.31	15.28	15.29	0.11	0.06	0.07
Li	38.81		20.73					16.36		39.32			23.84				
Rb	6334.71		9523.38					9153.39		9765.08			5958.59				
Cs	420.55		1419.43					1518.38		1763.09			768.64				
B	1.52		1.53					1.85		2.03			1.58				
P ₂ O ₅	0.090	0.097	0.000	0.000	0.122	0.142	0.154	0.068	0.375	0.234	0.216	0.072	0.386	0.358	0.004	0.014	0.000
Сумма	100.03	98.98	99.05	98.83	98.66	98.80	98.82	100.01	98.75	99.92	98.66	99.10	99.71	98.73	98.57	99.91	99.70
Кристаллохимические коэффициенты, рассчитанные на 8 атомов кислорода (количество ионов в пересчете на 8 атомов О)																	
Si	3.01	3.02	3.01	3.03	3.01	3.01	3.02	3.01	3.00	2.99	3.01	3.02	2.98	2.99	3.04	3.02	3.03
Al	0.99	0.99	1.00	0.98	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	0.98	1.00	1.01	1.00	1.01	0.99
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Na	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.84	0.89	0.89
K	0.89	0.91	0.91	0.90	0.88	0.91	0.90	0.91	0.88	0.89	0.89	0.90	0.90	0.91	0.01	0.00	0.00
Li	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rb	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Cs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B	0.00		0.00					0.00		0.00			0.00				
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
Молекулярные проценты основных миналов																	
Ab	4.8	3.9	2.4	3.4	3.2	3.5	3.7	3.7	4.7	7.2	6.9	5.1	5.0	5.2	98.8	98.9	98.9
An	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.7
Or	95.2	96.1	97.5	96.6	96.8	96.5	96.3	96.2	95.3	92.8	93.1	94.9	95.0	94.8	0.7	0.4	0.4

Примечание. В первичных анализах – Li, Rb, Cs, B – г/т, остальные – мас.%, здесь и далее: пустая клетка – отсутствие определения.

Акцессорные минералы. Диагностика акцессорного парагенезиса пегматитов проводилась методом сканирующей электронной микроскопии (BSE SEM) на аппаратуре LEO-1430VP (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Набор акцессорных минералов в сподуменовых и безсподуменовых пегматитах оказался идентичным и, помимо макроскопически диагностируемых граната и пирита, представлен танталит-колумбитом, цирконом, уранинитом, монацитом, микролитом, титанитом, рутилом, ксенотимом, пирохлором, апатитом, баритом, пирротинитом, касситеритом. Подавляющее большинство из этих минералов являются мик-

ровключениями в главных породообразующих минералах пегматитов: сподумене, кварце и полевых шпатах, отдельные акцессорные минеральные фазы включены в минералы, также относящиеся к акцессорному парагенезису.

Гранат встречается в виде включений только в породообразующих минералах пегматитов – сподумене, полевых шпатах, кварце и мусковите. Он образует идиоморфные зерна буровато-красного цвета размером от десятых долей миллиметра до первых миллиметров. По составу гранат пегматитов Ташелгинского поля соответствует альмандин-спессартину. Формула, рассчитанная

кислородным методом на 12 атомов кислорода, для граната из мусковитовых пегматитов – $(\text{Fe}_{1.07-2.37}, \text{Mn}_{0.57-1.20}, \text{Ca}_{0.02-0.99}, \text{Mg}_{0.07-0.10})\text{Al}_{1.93-2.04}\text{Si}_{2.94-3.05}\text{O}_{12}$; для граната из сподуменовых пегматитов – $(\text{Fe}_{0.54-2.20}, \text{Mn}_{0.70-2.18}, \text{Ca}_{0.00-0.22}, \text{Mg}_{0.10-0.11})\text{Al}_{1.93-2.13}\text{Si}_{2.95-3.06}\text{O}_{12}$. Гранат как в сподуменовых, так и в безсподуменовых пегматитах характеризуется зональностью: внешние зоны кристаллов обогащены кальцием относительно центральных зон.

Пирит наблюдается в виде изоморфных зерен кубического габитуса размером от 0,5 до 2–3 мм, как правило, несущих следы замещения гидроокислами железа. Зерна пирита – это микровключения в сподумене, полевых шпатах и мусковите, и в то же время они являются «хозяевами» для кварца и танталит-колумбита, что свидетельствует о синхронной кристаллизации пирита и породообразующих минералов.

Циркон представлен идиоморфными микровключениями в гранате и танталит-колумбите, отдельные зёрна циркона как в мусковитовых, так и в сподуменовых пегматитах содержат обильную вкрапленность уранинита. Формула циркона, рассчитанная на 4 атома кислорода, – $(\text{Zr}_{0.83-0.92}, \text{Hf}_{0.06-0.11})\text{Si}_{1.01-1.05}\text{O}_4$.

Минералы рода танталит-колумбита диагностированы в виде микровключений в породообразующих минералах – кварце и альбите, а также в гранате и пирите. Кристаллы танталит-колумбита имеют кристаллографические очертания, однако края кристаллов неровные. Отдельные кристаллы имеют очень сложную форму. Кристаллы танталит-колумбитов неоднородные, в них зафиксированы зоны, обогащённые как танталом, так и ниобием, причём в некоторых кристаллах эти зоны яв-

ляются зонами роста, а в других – незакономерно расположенными участками. Интересно отметить, что в одном из кристаллов танталит-колумбита отмечен секущий прожилки кальциевого микролита.

Перспективы освоения литиевых руд Горной Шории. Отечественная сырьевая база литиевых руд качественно отличается от зарубежной. Содержание лития в их составе (в расчете на оксид лития) находится в пределах 0,6–1,5%, руды плохо обогащаются, выход лития в концентрат составляет 18–25%. Тем не менее, рудные месторождения лития в силу достаточно широкого использования природного сподуменного концентрата в стекольной и керамической промышленности (более 20% в структуре потребления лития и его соединений) представляют интерес для промышленного освоения. Основной путь повышения рентабельности отработки бедных литиевых руд связан с повышением комплексности их промышленной переработки, в том числе с использованием отходов производства для получения дефицитных строительных материалов [11, 12]. В частности, для покрытия дефицита в цементе существует множество сырьевых источников, к числу которых относятся и литиеносные редкометальные пегматиты. Расчеты экономической эффективности комплексной переработки литиевых руд Ташелгинского месторождения показали, что эффективными оказываются только варианты расчетов, учитывающие комплексную переработку исходной руды – получение, помимо литиевой продукции, шлама для производства цементного клинкера с дальнейшим получением цемента.

Т а б л и ц а 2

Составы сподуменов из сподуменовых пегматитов Ташелгинского поля

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	65.79	66.29	65.84	65.93	65.56	65.92	65.44	65.90	66.01	65.85	65.67	65.62
Al ₂ O ₃	27.59	27.25	27.52	27.76	27.38	27.43	27.61	27.42	27.25	27.20	27.08	27.02
FeO	0.58	0.63	0.30	0.31	0.53	0.53	0.56	0.53	0.52	0.52	0.58	0.52
MnO	0.09	0.08	0.14	0.10	0.13	0.07	0.12	0.15	0.13	0.11	0.10	0.09
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.12	0.17	0.12	0.12	0.21	0.13	0.16	0.14	0.10	0.15	0.17	0.18
K ₂ O	0.01	0.00	0.01	0.00	0.10	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Li ₂ O*	6.98	5.54	6.84	7.40	6.60	6.46	7.35	6.42	5.90	5.89	5.74	5.66
Li	4.00	3.82	3.71	3.87	3.73	3.84	3.27	3.88	3.62	3.25	3.99	4.00
Rb	0.06	0.60	1.17	2.30	2.76	4.73	16.39	1.14	0.74	106.85	4.64	4.30
Cs	0.77	0.63	2.29	4.50	1.90	8.22	24.80	0.90	1.60	27.99	1.88	3.63
H ₂ O	0.04	0.14	0.12	0.24	0.09	0.47	0.40	0.15	0.15	2.82	0.16	0.19
Сумма	101.20	100.11	100.91	101.88	100.60	101.03	101.66	100.73	100.06	102.56	99.50	99.27
Кристаллохимические коэффициенты (расчёт на 1 атом Al)												
Si	2.02	2.06	2.03	2.02	2.03	2.04	2.01	2.04	2.06	2.05	2.06	2.06
Al	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fe	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Li	0.86	0.69	0.85	0.91	0.82	0.80	0.91	0.80	0.74	0.74	0.72	0.72

Примечание. Rb и Cs – в г/т, остальные – в мас.%, * – содержание рассчитано из недостатка положительных зарядов.

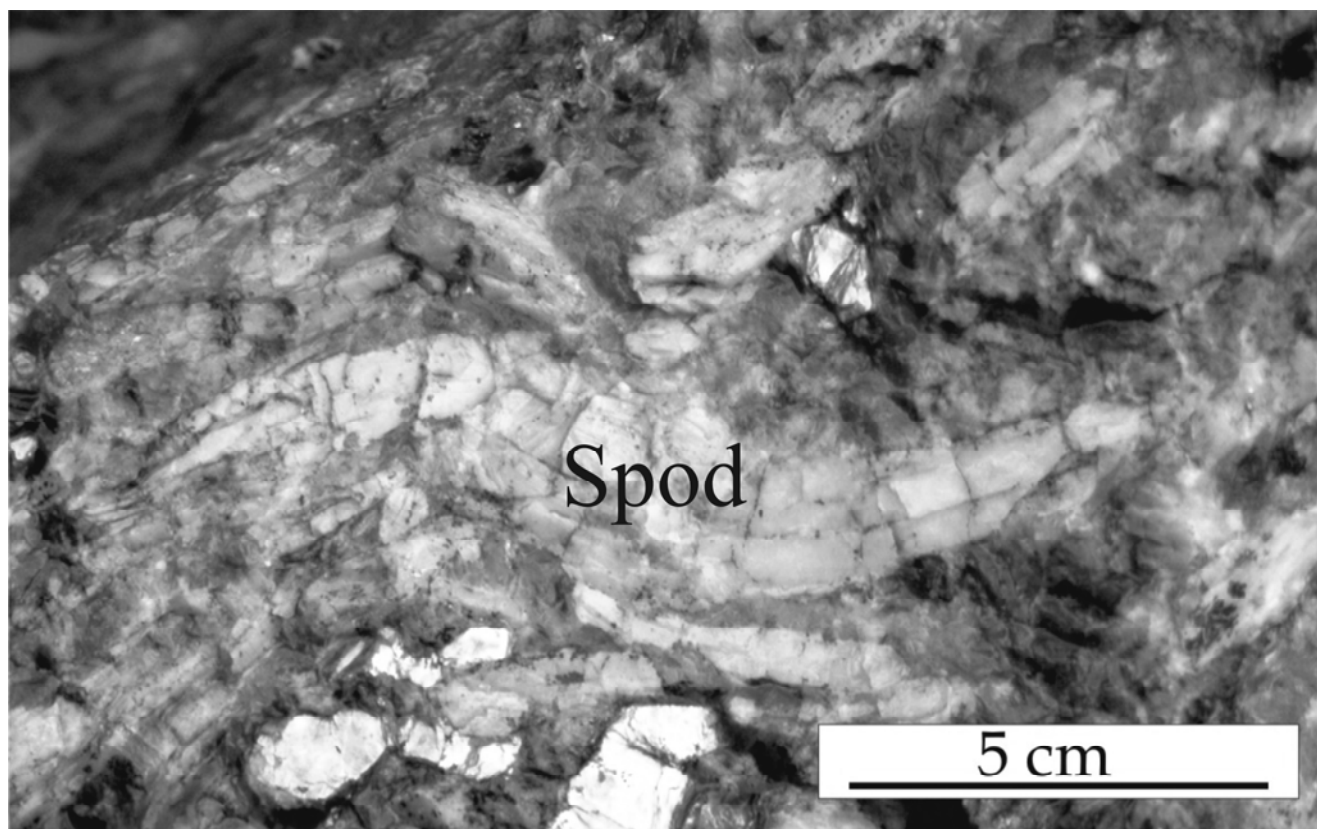


Рис. 2. Текстурно-структурный облик пегматитов жилы Юрьевская, отражающий степень их катаклаза и присутствие S-образных кристаллов сподумена; spod – сподумен

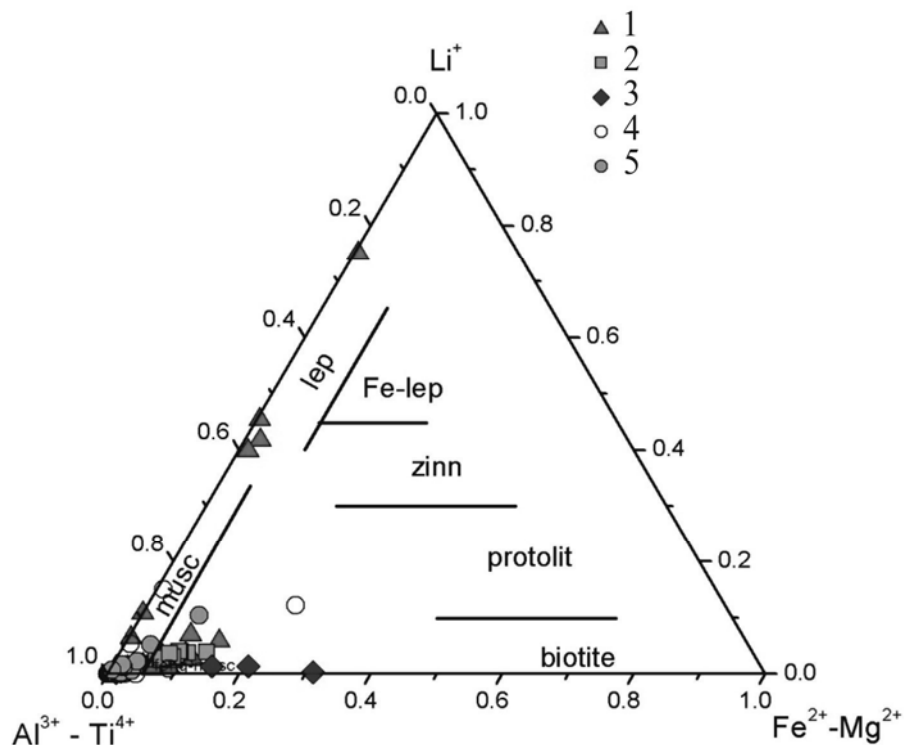


Рис. 3. Составы слюд сподуменовых пегматитов Ташелгинского поля на диаграмме Li-Al-Fe [7] в сравнении с составами слюд из сподуменовых пегматитов некоторых месторождений мира: 1 – слюды сподуменовых пегматитов [8], 2 – слюды Ташелгинского поля, 3 – слюды Завитинского пегматитового поля и кукульбейского гранитного комплекса [8], 4 – составы мусковитов [9], 5 – слюды пегматитового поля Кентича, Эфиопия [10]

Достоинством предлагаемой комплексной переработки бедных сподуменовых руд без их обогащения являются: 1) исключение многостадийной операции обогащения руды; 2) возможность использования бедной сподуменовой руды с содержанием Li_2O – 0,6–0,8%; 3) совмещение производства литиевых продуктов и цемента; 4) производство литийсодержащего цементного клинкера, что позволяет получать цементы с улучшенными свойствами.

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Ташелгинское рудное поле представлено редкометальными пегматитами с Li и Ta-Nb минерализацией, при промышленном значении Li минерализации. Минералами-концентраторами лития в сподуменовых пегматитах Ташелгинского поля являются: сподумен – $6,24 \pm 0,46$ мас.% Li_2O , мусковит – $0,25 \pm 0,04$ мас.% Li_2O и калиевый полевой шпат – $0,003 \pm 0,001$ мас.% Li_2O .

2. Изотопно-геохронологические данные показывают, что несмотря на широкий разброс значений,

полученных U-Pb и Ar-Ar методами, пегматиты образовались как минимум на 100 млн лет раньше присутствующих в регионе гранитов и, следовательно, могут быть отнесены к объектам, для которых генетическая связь с гранитоидным магматизмом не устанавливается.

3. Взаимодействие с вмещающими породами – мраморами – проявилось на завершающем этапе становления пегматитов, что отразилось в наличии высококальциевых зон граната и замещении окислов Ta, Nb и Ti кальций-содержащими минералами – Са-микролитом и титанитом.

4. Сходство акцессорной минерализации сподуменовых и безсподуменовых пегматитов указывает на их генетическое родство.

5. Экономически эффективной является комплексная переработка руд Ташелгинского месторождения с получением, помимо литиевой продукции, шлама для производства цементного клинкера с дальнейшим получением цемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владимиров А.Г., Пономарева А.П., Каргополов С.А. и др. Неопротерозойский возраст древнейших образований Томского выступа (Горная Шория) на основании U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr и Ar-Ar изотопного датирования // Стратиграфия. 1999. Т. 7, № 5. С. 28–42.
2. Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г. и др. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск : Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2000. 120 с.
3. Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Руднев С.Н. Геологическое строение, магматизм и метаморфизм Горной Шории как одного из типовых регионов Алтае-Саянской складчатой области // Актуальные вопросы геологии и минералогии юга Сибири : Материалы науч.-практ. конф., пос. Елань, Кемеровской области, Новосибирск : Изд-во ОИГМ СО РАН, 2001. С. 18–30.
4. Анникова И.Ю., Уваров А.Н., Смирнов С.З. и др. Геологическая позиция, минеральный состав и возраст Ташелгинского месторождения сподуменовых пегматитов (Горная Шория) // Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность : материалы совещания. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011. С. 14–16.
5. Владимиров А.Г., Ляхов Н.З., Исупов В.П. и др. Литиевые месторождения сподуменовых пегматитов Сибири и инновационные технологии в электрохимической энергетике // Разведка и охрана недр. № 6. 2011б. С. 13–19.
6. Уваров А.Н., Ляпунов И.А., Юрьев А.А. и др. Прогнозно-поисковые работы на редкие металлы в пределах Ташелгинского рудного района в Кемеровской области за 2005–2007 гг. (в 2 книгах и 1 папке). Геологический отчет. Елань : ФГУП «Запсибгеолсъемка», 2007. 410 с.
7. Foster M.D. Interpretation of the composition of lithium micas // U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 1960, № 354E. P. 115–147.
8. Загорский В.Е., Макагон В.М., Шмакин Б.М. и др. Гранитные пегматиты. Новосибирск : Наука, 1997. Т. 2. 278 с.
9. Минералы. Справочник. Т. 4, вып. 1 / ред. Ф.В. Чухров и Н.Н. Смолянинова. М. : Наука, 1992. 598 с.
10. Küster D., Rolf L., Romer, Dandena Tolessa et al. The Kenticha rare-element pegmatite, Ethiopia: internal differentiation, U-Pb age and Ta mineralization // Miner Deposita. 2009. Vol. 44. P. 723–750.
11. Коцупало Н.П., Рябцев А.Д., Ягольницер М.А., Ляхов Н.З. Рентабельная переработка литиеносных бедных руд с получением соединений лития и цемента // Химия в интересах устойчивого развития. 2009. Т. 17, № 2. С. 151–159.
12. Коцупало Н.П., Рябцев А.Д., Ягольницер М.А. О рентабельности производства продукции при комплексной переработке литиевых руд // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2008. № 6. С. 52–56.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 26 августа 2013 г.