

## ГЕОЛОГИЯ

УДК 549.2/.8+553.063

*В. В. Гордиенко, П. О. Ликберг, В. В. Михайлов, Н. В. Чуканов***МИНЕРАЛЫ ТОРТВЕЙТИТ-СОДЕРЖАЩЕГО ПЕГМАТИТА ИТТЕРЛИДА (ЮГО-ЗАПАДНАЯ ШВЕЦИЯ)**

Среди многочисленных пегматитов, развитых в доготских гранито-гнейсах юго-западной Швеции, только в одном из них (тело Иттерлида) И. Ландгофом [1] обнаружен редкий скандиевый силикат – тортвейтит –  $\text{Sc}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ . Минералого-геохимическая характеристика этого объекта представляет особый интерес, поскольку она дает возможность сопоставить особенности его вещественного состава с тортвейтитсодержащими пегматитами южной Норвегии, залегающими в сходной геологической обстановке (доготские гранито-гнейсы Телемарк), но гораздо более широко распространенными [2, 3]. Кроме того, появляется возможность сравнения названного типа пегматитов с другими представителями Nb-Y-REE семейства с иными формами Sc-минерализации.

Согласно классификации О. Бротзена [4], пегматитовое тело Иттерлида (Оверлида) принадлежит к I парагенетической группе пегматитов: магнетит-биотитовым с уранинитом и Y-REE минералами. К этой же парагенетической группе он относит и тортвейтитсодержащие пегматиты южной Норвегии. По нашему мнению, наименование этой группы пегматитов является неудачной, так как никак не затрагивает их породообразующие минералы. Чтобы восполнить этот недостаток, обратимся именно к морфогенетической и геохимической характеристикам породообразующих минералов пегматита Иттерлида.

Преобладающим минералом здесь является кислый плагиоклаз (Пл), альбит–олигоклаз 7–15, представленный исключительно крупнотаблитчатой морфогенетической разновидностью. Для нее типичны изометрические субидiomорфные индивиды, тонкосдвойникованные по альбитовому закону, с прямолинейными границами двойниковых швов. Размеры индивидов таблитчатого Пл постепенно увеличиваются к центру пегматитового тела от 2–5 до 50 см, не изменяя своего морфологического облика и двойникового строения. Характерно, что другие морфогенетические разновидности Пл в теле Иттерлида практически отсутствуют (в том числе сахаровидный Пл и Пл-клевеландит). Это позволяет считать пегматит «стерильным» от поздних наложенных процессов альбитизации.

Другим породообразующим минералом, но значительно менее распространенным является калиевый полевой шпат (КПШ). Он также образует изометрические субидiomорфные выделения, по размеру сопоставимые с таблитчатым Пл, которые составляют совместно с ксеноморфными зернами кварца агрегаты пегматоидной или мелкоблоковой структуры. Последние, обогащаясь КПШ относительно Пл, тяготеют к центральной части пегматитового тела. КПШ обладают тонкорешетчатым двойниковым строением, свидетельствующим о

Таблица 1. Химический состав полевых шпатов

Характеристики	Компоненты	Плагиоклаз				Кальевый полевой шпат					
		$\bar{x}$	$\sigma_{n-1}$	V, %	Образец ОУ-6 <sup>1</sup>	Керамич. форм. <sup>2</sup>	$\bar{x}$	$\sigma_{n-1}$	V, %	Образец ОУ-6 <sup>1</sup>	Керамич. форм. <sup>2</sup>
Содержание, вес. %	Na	8,80	0,97	11	7,97	8,20/1,0	2,46	0,23	9,3	2,35	2,5/0,5
	K	0,68	0,09	13	0,68	0,46/0,14	10,65	0,56	5,2	10,93	10,2/0,8
	Ca	1,05	0,21	20	1,43	3,5/1,2	0,07	0,08	20	0,075	—
	Li	1,6	1,0	60	3,2	4,5/1,4	1,2	0,5	42	0,9	2,1/1,4
	Rb	18	8	44	25	20/8	743	95	13	768	430/160
Концентрация, ppm	Cs	<5	<5	—	<5	2,8/1,5	20	5	25	21	12/7,5
	Pb	47	23	50	35,5	5/3	110	20	19	134	125/90
	Ba	54	24	45	100	210/170	3670	1900	52	3500	2500/3000
	Sr	40	27	68	100	190/180	340	200	59	75	320/120
	Ab	87,9	9	9	85,2	80/5	21,7	2,0	20,7	20,7	22/2
Миналы, %	An	7,4	5	5	10,1	17/5	0,5	0,1	0,6	0,6	—
	Ort	4,7	0,7	0,7	4,7	3/1	77,8	2,0	78,7	88/2	—
	K/Rb	430	53	53	272	231	143	21	142	142	240
	K/Cs	>1,360	—	—	>1360	1640	5300	1570	5205	5205	16500
	Rb/Cs	>3,6	—	—	>3,6	7	37	5	36,6	36,6	36
Индикаторные отношения	K/Ba	126	134	134	68	22	29	18	31,2	31,2	41
	Rb/Ba	0,33	0,18	0,18	0,25	0,095	0,20	0,13	0,22	0,22	0,17
	Ca/Sr	270	110	110	215	184	2,1	7	10	10	—
	Rb/Sr	0,70	0,52	0,52	0,25	0,105	2,2	4	10,2	10,2	1,3

Примечание. <sup>1</sup> Образец ОУ-6 – сосуществующие с тортвейгитом полевые шпаты; <sup>2</sup> керамич. форм. – оценка генеральных средних для петматитов керамической формации (табл. 3.5 в [5]).

их принадлежности к триклинной модификации (микроклин), и присутствием тонких (доли миллиметра) ленточных пертитов. Спецификой пегматита Иттерлида является также довольно низкое содержание кварца (менее 20%). При этом подавляющая его часть сосредоточена в гнездообразных участках, имеющих характерную петельчатую пойкиловидную структуру, возникающую за счет замещения блокового Пл червеобразными зернами кварца.

Вариации химического состава полевых шпатов приведены в табл. 1. В ней указаны статистические оценки генеральных средних содержаний ряда химических элементов в Пл и КПШ, принадлежавших пегматитам керамической формации, которые, по нашему мнению, наиболее близки к рассматриваемому объекту как по минеральному составу, так и по геологическим условиям образования (см. табл. 3.5, 3.10, 3.11 в [5]). Их сравнение показывает, что хотя по видообразующим компонентам (Na, K и Ca) полевые шпаты пегматита Иттерлида довольно близки к среднему составу тех же минералов из пегматитов керамической формации, все же наблюдается определенный сдвиг в их составе в сторону более высокой степени фракционирования. Это особенно отчетливо видно на примере пониженной основности плагиоклаза пегматита Иттерлида ( $7,4 \pm 5\%$ , An против обычных  $17 \pm 5$  An). Что же касается малых элементов – примесей, то такая тенденция фиксируется еще более ярко обеднением плагиоклаза Иттерлида Ba и Sr (соответственно в 6 и 5 раз) и девятикратным его обогащением Pb при значительном увеличении отношений K/Ba, Ca/Sr и Rb/Sr.

Аналогичная картина наблюдается и в составе КПШ. В пегматите Иттерлида он заметно обогащен Cs и Rb (почти вдвое) и резко обеднен Sr (в 4 раза) по сравнению с КПШ-II, отвечающем максимально высокой степени дифференциации минералообразующей среды для пегматитов керамической формации. Соответственно главные индикаторные отношения K/Rb, K/Cs, Rb/Cs как показатели степени накопления редких флюофильных элементов в пегматитовом процессе оказываются пониженными.

К числу породообразующих минералов пегматита Иттерлида следует добавить биотит. Он образует лейсты до 3–5 см в промежуточной зоне пегматитового тела среди двухполевошпатового агрегата пегматоидной структуры, иногда ассоциируясь с идиоморфными октаэдрическими кристаллами магнетита. По своему химическому составу (табл. 2) биотит отвечает промежуточному члену ряда аннит–флогопит (содержание аннитового компонента около 50%). При этом он отличается аномально высокой концентрацией Mn, Rb и Pb (соответственно в 7, 4 и 3 раза выше, чем среднее содержание этих элементов в биотите пегматитов керамической формации), а также Zn, т. е. группой флюофильных элементов, накапливающихся в кристаллизационном остатке пегматитообразующих систем. Что же касается пиррофильных элементов группы железа – Ni, Co, V, Cr, а также Ba, то их содержание в биотите пегматита Иттерлида резко понижено (15–20 г/т). Невысокие концентрации характерны также для Sn, Sc и Nb (соответственно 15, 70 и 50 г/т).

Среди второстепенных и акцессорных минералов в пегматите Иттерлида нами наблюдались магнетит, мусковит, гранат, тортвейтит (Тор), эвксенит (Эвк), апатит. Рассмотрим более подробно тортвейтит и его парагенезис.

(Тор) нами встречен в виде уплощенно-призматических кристаллов до 2–3 см в длину и 0,5 см в поперечнике. Минерал полупрозрачен, имеет алмазный блеск на плоскостях совершенной спайности и светлую желтовато-зеленую окраску. По внешнему виду очень напоминает низкожелезистый эпидот (цоизит). Кристаллы Тор располагаются в интерстициях между гранями идиоморфных выделений Пл и КПШ в агрегате мелкоблоковой структуры. Такие «безразличные» возрастные взаимоотношения этих минералов говорят об их близкой или одновременной кристаллизации. Это, в свою очередь, позволяет оценить *P–T*-условия равновесия названного трехминерального парагенезиса с использованием двухполевошпатового свинцового геотермометра [6] и известной *P–T*-диаграммы [7]. Они отвечают по температуре 520–530 °С и по давлению 2,5–3 кбар (образец ОV-6, см. табл. 1).

Таблица 2. Химический состав биотита

Химические компоненты	Содержание, вес. %	Коэффициенты кристаллохимической формулы (ККФ)		Мольная доля, масс. %
SiO <sub>2</sub>	38,75	2,956 0,980 0,064	Σ = 4,000	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,90			—
TiO <sub>2</sub>	2,94			3,6
FeO	21,63	0,105 1,363 1,324 0,070	Σ = 2,862	47,7
MgO	11,64			46,3
MnO	1,08			2,4
Na <sub>2</sub> O	0,30	0,044 1,076 0,020	Σ = 1,140	—
K <sub>2</sub> O	11,06			—
Rb <sub>2</sub> O	0,40			—
Li <sub>2</sub> O	0,05	—	—	—
Сумма	98,75	—	8,002	100,0
Pb	0,012	—	—	—
Zn	0,128	—	—	—
Sc	0,150	—	—	—
Всего	99,04	—	—	—

В ассоциации с Тор постоянно встречается Эвк, характеризующийся густо-черным цветом, раковинчатым изломом и смолистым блеском. Он образует выделения неправильной формы до 3–5 см в поперечнике либо на границе Тор и Пл, либо непосредственно в плагиоклазе, замещая эти минералы. Взаимоотношения Эвк и КПШ наблюдать не удалось. Другие акцессорные минералы в парагенезисе с Тор и Эвк нами не наблюдались, хотя Ландгоф, впервые обнаруживший Тор в пегматите Иттерлида, указывает на присутствие в рассматриваемой ассоциации также циркона [1].

Химический состав Тор характеризует табл. 3. Он хорошо укладывается в типовую формулу минерала Sc<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, если принять во внимание, что незначительная часть Sc<sup>3+</sup> (около

Таблица 3. Химический состав Тор (вес. %) по данным микронзондового анализа

Химические компоненты, вес. %	Характеристики образца					
	Образец ОУ-6, Иттерлида, юго-западная Швеция			Лйосланд, Ивеланд, Сетесдаль, южная Норвегия		
	$\bar{X}_4$	$\sigma_{n-1}$	ККФ	$\bar{X}_4$	$\sigma_{n-1}$	ККФ
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47,44	1,60	1,777	46,06	0,40	1,805
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,14	0,15	0,095	6,70	1,60	0,160
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09	0,05	0,001	1,56	0,12	0,020
ZrO <sub>2</sub>	1,03	0,30	0,022	0,85	0,60	0,019
FeO	2,22	0,60	0,080	1,94	0,80	0,073
MnO	0,51	0,08	0,019	0,23	0,10	0,009
Сумма <sub>1</sub>			1,994			2,086
SiO <sub>2</sub>	45,61	1,60	1,960	42,00	2,30	1,889
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,23	0,09	0,012	0,47	0,10	0,025
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,85	0,11	0,031	—	—	—
Cl	0,02	0,01	0,002	—	—	—
S	0,01	0,01	0,001	—	—	—
Сумма <sub>2</sub>			2,006			1,914
Всего	102,15	—	4,000	99,81	—	4,000

10%) замещается  $Y^{3+}$  (4,8%),  $Fe^{3+}$  (4%),  $Zr^{4+}$  (примерно 1%). Небольшой дефицит  $Si^{4+}$  компенсируется присутствием  $P_2O_5$  (0,85 масс. %). По сравнению с Тор из южной Норвегии (Лйосланд, Ивеланд) Тор из месторождения Иттерлида заметно обеднен Y и особенно Yb и незначительно обогащен Fe, Mn и Zr.

Довольно необычным оказался состав Эвк, ассоциирующего с Тор, результаты микрозондового анализа которого приведены в табл. 4. Он удовлетворительно укладывается в типовую формулу  $AB_2O_6$ , но при этом катионное наполнение группы А отличается большим своеобразием. В ней на долю  $Sc^{3+}$  приходится около 15% ( $Sc_2O_3 = 1,82 \pm 0,14$  масс. %), что для известных Эвк не отмечалось ранее.

Таблица 4. Химический состав (вес.%) Эвк (образец ОV-6) по данным микрозондового анализа

Химические компоненты, вес. %	$\bar{X}_3$	$\sigma_{n-1}$	ККФ $AB_2O_6$	Доля, атомн. % в группах А и В
$Y_2O_3$	15,05	0,10	0,480	46,2
$Ce_2O_3$	0,16	0,20	0,003	0,3
$Nd_2O_3$	0,52	0,06	0,010	1,0
$Sm_2O_3$	0,70	0,05	0,013	1,3
$Yb_2O_3$	1,65	0,10	0,030	3,0
$Sc_2O_3$	2,82	0,14	0,148	14,2
CaO	2,90	0,37	0,186	17,9
SrO	1,16	0,23	0,040	3,8
$Na_2O$	0,26	0,14	0,030	2,9
$ThO_2$	3,41	0,12	0,046	4,4
$UO_3$	4,26	1,46	0,054	5,2
			$\Sigma_A = 1,040$	$\Sigma_A = 100,0$
$Nb_2O_5$	44,21	1,31	1,183	60,5
$Ta_2O_5$	4,43	0,29	0,072	3,6
$TiO_2$	4,00	0,36	0,180	9,2
FeO	7,25	0,52	0,363	18,5
MnO	0,48	0,20	0,024	1,2
MgO	0,15	0,21	0,013	0,7
$SiO_2$	2,08	0,04	0,125	6,3
			$\Sigma_B = 1,960$	$\Sigma_B = 100,0$
Сумма	95,49	—	3,000	—

Кроме того, характерны повышенное содержание Sr (доля около 4%,  $SrO = 1,16$  масс. %) и сравнительно низкая доля REE (суммарно 4,1%), среди которых преобладают Yb и Sm; легкие REE и La практически отсутствуют. Содержания Th и U и их соотношения можно считать стандартными (общая доля приблизительно 10%,  $U/Th = 1,17$ ). Ведущая роль в группе А принадлежит Y (примерно 50%), на долю же Ca приходится 18%, что для Эвк вполне типично.

Что касается катионного наполнения группы В, то здесь резко преобладает Nb (более 60%), за ним следует Fe (18,4%), на долю Ti приходится лишь 9,1%, а на долю Ta — менее 4%.

Среди других аксессуарных минералов пегматита Иттерлида наибольший интерес представляет гранат, принадлежащий к ряду альмандина-спессартина. Выделяется три морфо-

генетических разновидности граната, которые, как показано ниже, заметно отличаются по своему химическому составу. По возрастным взаимоотношениям с другими минералами можно наметить определенную последовательность формирования этих разновидностей граната, которые не достигают, однако, ранга отдельных генераций.

Наиболее ранним является гранат, образующий зерна размером в доли миллиметра в приконтактовом пегматите в ассоциации с мелкочешуйчатым биотитом и развивающимся по нему хлоритом (Гр-1). Более поздней разновидностью является Гр-2, строящий идиоморфные кристаллы от 1 до 3 мм в форме тетрагонтриоктаэдров на границах зерен крупнотаблитчатого Пл в агрегатах пегматоидной и блоковой структур. К наиболее поздней разновидности принадлежит Гр-3, представленный тетрагонтриоктаэдрами до 1 см в поперечнике, приуроченными к границам зерен Пл и кварца в агрегатах петельчатой структуры. Данные о составе Гр приведены в табл. 5. Они указывают на последовательное увеличение от первой к третьей разновидности Гр содержания Y (от 0,27 до 1,5 масс. %), и Yb (от 0,042 до 0,27 масс. %) при довольно стабильном соотношении Y/Yb ( $6,4 \pm 0,8$ ), а также Sc (от 0,02 до 0,07%) на фоне снижения содержания FeO.

Таблица 5. Химический состав гранатов

Характеристика	Компоненты	Гр-1	Гр-2	Гр-3
Содержание, вес. %	MnO	17,0	22,3	19,8
	FeO	16,0	15,7	14,2
	CaO	2,56	2,42	2,91
	MgO	0,66	0,60	0,60
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,34	1,55	1,90
Концентрация ppm	Yb	420	1700	2700
	Sc	450	750	1100
Минералы, %	Sps	45,4	52,0	49,8
	Alm	42,2	36,0	35,2
	Grs	8,6	7,1	9,3
	Pyg	3,2	2,6	2,7
	Y-Gr	0,6	2,3	3,0
	Σ	100,0	100,0	100,0
Индикаторные отношения	Y/Yb	14	16	12
	Y/Sc	4,6	12,6	10,5
	Yb/Sc	0,32	0,79	0,86

Приведенное выше описание минералов пегматитового тела Иттерлида показывает, что образование Top в существенно плагиоклазовых пегматитах отвечает по температуре (520–530 °C) субмагматической стадии их кристаллизации из высокодифференцированного остаточного расплава и, по-видимому, предшествует постмагматическим процессам альбитизации и мусковитизации. Среди минералов-индикаторов Sc-минерализации в пегматитах (гранат, биотит, магнетит и др.) [8] только состав Эвк, отличающийся резко повышенным содержанием Sc (Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> более 2 масс. %), может однозначно указывать на присутствие в конкретном пегматитовом теле Top.

Авторы благодарят за помощь в обработке материала и аналитических исследованиях сотрудников СПбГУ Г. И. Калининцеву и Л. А. Тимохину.

## Summary

*Gordienko V. V., Likberg P. L., Michailov V. V., Chukanov N. V.* Minerals of thortveitite-containing pegmatite of Itterlida (south-western Sweden).

The variations of rock-forming minerals (feldspar, biotite, garnet) and Sc-containing accessories (thortveitite and euxenite) composition from Itterlida (south-western Sweden) pegmatite are considered. The given data determine an accessory of the investigated object as a plagioclase type of ceramic formation pegmatite, but with attributes of the increased level of rare element fractional crystallization. The forming of thortveitite corresponds with a submagmatic pegmatite-forming stage at temperature conditions 520–530 °C, previous postmagmatic albitization and muscovitization stages.

## Литература

1. *Landghof J.* Thortveitite from granitic NYF pegmatities in Sweden // *Geol. Foren. Stkh. Forh.* 1961. Vol. 118, N A-54.
2. *Björlikke H.* The granite pegmatites of Southern Norway // *Amer. Miner.* 1937. Vol. 22, N 3–4.
3. *Neuman H.* The scandium content of some Norwegian minerals and the formation of thortveitite, a reconnaissance survey // *Norsk. Geol. Tidsskr.* 1961. Vol. 41.
4. *Brotzen O.* Mineral-association in granitic pegmatities // *Geol. Fdr. Forh.* 1959. Bd 81.
5. *Гордиенко В. В.* Гранитные пегматиты. СПб., 1996.
6. *Гордиенко В. В., Пономарева Н. И.* Распределение свинца между сосуществующими калиевым полевым шпатом и плагиоклазом как диполевошпатовый геотермометр // *Докл. РАН.* 1994. Т. 338, № 2.
7. *Stormer J. C., Jr.* A practical two-feldspar geothermometer // *Amer. Miner.* 1975. Vol. 60, N 7–8.
8. *Гордиенко В. В.* Минералого-геохимические критерии присутствия скандиевой минерализации в гранитных пегматитах // *Докл. РАН.* 1997. Т. 357, № 2.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2006 г.