

Б. Е. БОРУЦКИЙ, Е. И. СЕМЕНОВ

ПОЛЕВЫЕ ШПАТЫ ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА
ИЛИМАУСАК

В юго-западной Гренландии находится один из интереснейших щелочных массивов мира — Илимаусак, характеризующийся широким развитием редкометальной минерализации (Zr, Nb, TR, U, Be, Li).

Массив сложен в основном разнообразными щелочными, нефелиновыми и содалитовыми сиенитами (авгитовые и кварцевые щелочные сиениты, пуласкиты, фоййиты, эвдиалитовые нефелиновые сиениты — какортокиты и пойкилитовые нефелиновые сиениты — науйиты). В какортокитах, науйитах и их поздней меланократовой фации широким развитием пользуются пегматитовые образования.

Щелочные полевые шпаты являются широко распространенными минералами пород и пегматитов. В фоййитах, какортокитах и науйитах они представлены микропертитами варьирующего состава в пределах $Or_{75}Ab_{25} - Or_{60}Ab_{40}$, а в пуласкитах — даже антипертитами состава $Or_{30}Ab_{70}$ (Ferguson, 1964). Соотношение калия и натрия, по данным полных химических анализов и частных определений, в этих полевых шпатах: 12,9—17,0% K_2O при 3,7—0,3% Na_2O ; CaO отсутствует (Böggild, 1953).

Методом фотометрии пламени (лаборатория Е. А. Фабриковой) в образцах щелочных полевых шпатов, собранных Е. И. Семеновым из ряда пегматитов во время посещения им массива Илимаусак, было определено содержание рубидия и калия и вычислено K/Rb-отношение (табл. 1). Максимальное содержание рубидия (0,24—0,40%) и минимальное K/Rb-отношение (30—50) были установлены в полевых шпатах из пегматитов наиболее поздних пород массива — науйитах и их меланократовой фации. Именно эти породы и их дериваты резко обогащены редкими (Nb, TR, U, Be, Li) и летучими (F, Cl) компонентами. Полевые шпаты ранних

Таблица 1

Содержание калия и рубидия в щелочных полевых шпатах из пегматитов различных пород массива Илимаусак

№ обр.	Тип пород, в которых залегает пегматит	K	Rb	K/Rb
376	Меланократовые науйиты	12,4	0,40	31
377	Науйиты	12,0	0,24	50
346	Какортокиты	10,0	0,15	67
335	Пуласкиты	6,2	0,04	155
338	Щелочные сиениты	4,2	0,01	420

пород массива (щелочных сиенитов и пуласкитов) обеднены рубидием (0,01—0,04%) и имеют наиболее высокое K/Rb-отношение (150—420).

Для щелочных полевых шпатов из меланократовых науэйттов, науэйттов и какортокитов и из пегматитовых образований в меланократовых науэйттах, науэйттах, какортокитах, пуласкитах и фойяитах были приготовлены ориентированные шлифы и измерены кристаллооптическая ориентировка и угол оптических осей. Ориентировка оптической индикатрисы в кристалле была определена по методу А. С. Марфунина (1962) с применением коноскопирования на универсальном столике Федорова, в шлифах, ориентированных перпендикулярно [100], с предварительно измеренным на гониометре наклоном будущего сечения шлифа по отношению к плоскостям спайности по (010) и (001). Погрешности определения

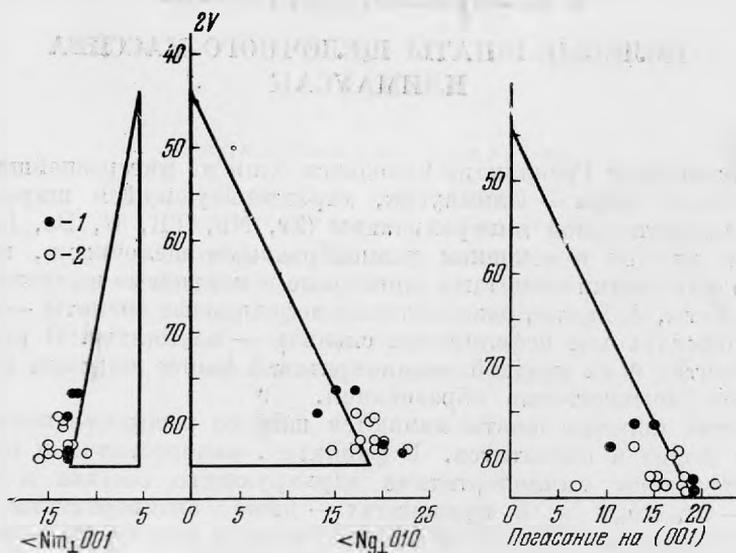


Рис. 1. Сопоставление углов оптических осей и кристаллооптической ориентировки щелочных полевых шпатов массива Илимгаусак в координатах $2V - \langle Nm : (001) \rangle$, $2V - \langle Ng : (010) \rangle$ и $2V -$ угол погасания на (001)

1 — микропертиты, 2 — гомогенные калишпаты

в рассматриваемом случае не должны превышать $\pm 1^\circ$ для угла оптических осей и $\pm 1-2^\circ$ для углов наклона осей оптической индикатрисы по отношению к кристаллографическим элементам.

Результаты измерения приведены в табл. 2 и на рис. 1. Ориентировка оптической индикатрисы в табл. 2 показана двумя способами: в угловых расстояниях между осями индикатрисы Np , Nm и Ng и оптическими осями A и B [ось A — ближайшая к полюсу спайности (010)] по отношению к полюсам спайности по второму и третьему пинакоидам, как это делается обычно, и по способу Бекке при помощи углов φ и λ (Марфунина, 1962).

Для полевых шпатов из пегматитовых образований в меланократовых науэйттах, науэйттах, пуласкитах и фойяитах на рентгеновском дифрактометре УРС-50И (отфильтрованное медное излучение) были определены степень рентгеновской триклинности и содержание натриевого компонента в виде твердого раствора в калишпатовой фазе. Степень рентгеновской триклинности определяли по методу Гольдсмита и Лавеса (Goldsmith, Laves, 1954) по расщеплению отражений $131-131$ и контролировали характером расщепления отражений $130-130$. Величину расщепления измеряли непосредственно в углах $2\theta_{Cu}$; за единицу принимали максимальные значения триклинности, соответственно $46,0'$ и $48,0'$. Содержание натриевого компонента в калишпатовой фазе определяли способом Боуэна и Таттла

(Bowen, Tuttle, 1950) по изменению положения отражения $20\bar{1}$ калишпатовой фазы в зависимости от количества примеси. В качестве внутреннего стандарта использовали $KBrO_3$ (Kuellmer, 1959); $2\theta_{CuK\alpha}$ для отражения $10\bar{1} KBrO_3$ принимали равным $20^\circ 12'$. Данную область дифрактограммы воспроизводили три — пять раз и результат усредняли. Величина погрешности не превышала $2-3'$, что соответствует $\pm 3-5$ мол. % альбитовой составляющей. Результаты измерений приведены в табл. 3 и на рис. 2.

Присутствие альбитовой фазы в микропертитах устанавливалось при просмотре шлифов под микроскопом и подтверждалось появлением на дифрактограммах самостоятельного отражения $20\bar{1}$ альбитовой фазы.

Сопоставление данных рентгенографического и оптического изучения показывает, что в породах массива Илимаусак присутствуют два типа щелочных полевых шпатов: микропертиты с содержанием альбитовой фазы от 35 до 79 мол. % и гомогенные калишпаты, в которых альбитовая фаза практически отсутствует. Микропертиты макроскопически серые или белые, непрозрачные, замутненные большим количеством обособлений альбитовой фазы. Под микроскопом в разрезе, перпендикулярном $[100]$, обнаруживается четкое полосчатое строение микропертитов, обусловленное закономерным расположением параллельно (010) крупных полисинтетически сдвойникованных по альбитовому закону обособлений альбитовой фазы в калишпате (рис. 3). Калиевая фаза также сдвойникована в виде тонких полос, ориентированных параллельно обособлениям альбита. Наиболее высокое содержание альбитового компонента установлено в полевых шпатах пуласкитов и меланократовых науйитов.

Гомогенные калишпаты прозрачные или полупрозрачные. Пертитовый альбит в них отсутствует или наблюдается только в краевых частях зерен. Калиевая фаза всегда сдвойникована в виде прямоугольных блоков с неправильными границами, столь крупных, что в каждой системе двойников можно измерить кристаллооптическую ориентировку под названием «шахматная». Нередко возникают еще более крупные двойниковые индивиды, а в ряде случаев все зерно калишпата сложено практически только двумя индивидами, имитирующими альбитовые двойники роста (рис. 5, 6).

Как микропертиты, так и гомогенные калишпаты из всех типов пород массива характеризуются большими углами оптических осей, колеблющимися в узких пределах (от 76 до $83,5^\circ$); это свидетельствует о высокой степени Si—Al-упорядоченности в каркасе их решетки. Полевые шпаты обоих типов характеризуются максимальной величиной рентгеновской триклинности ($0,93-1,00$). Оптическая триклинность также достигает максимальной величины, а для ряда образцов превышает максимальное значение триклинности по данным А. С. Марфунина (1962); измеренные углы $Ng : (010)$ варьируют от 13 до $22,5^\circ$, а углы погасания на (001) — от 7 до $21,5^\circ$. Калиевая фаза во всех исследованных образцах является стерильной в отношении примеси натриевого компонента, поэтому весь натрий, определяемый в химических анализах, должен быть отнесен за счет присутствующего в переменных количествах пертитового альбита. Таким образом, во всех рассмотренных породах массива Илимаусак распространен один и тот же структурно-оптический тип калишпата —

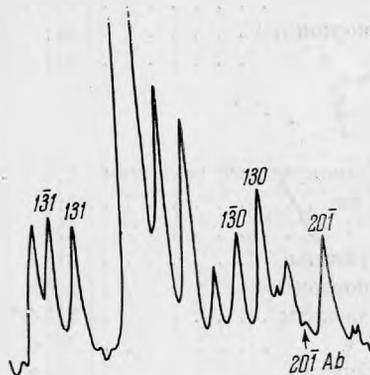


Рис. 2. Типичный вид дифрактограмм щелочных полевых шпатов из пегматитов массива Илимаусак. Пронумерованы отражения, используемые для рентгенографического анализа

Ориентировка оптической индикатрисы в щелочных

Комплекс пород	№ обр.	2V	⊥ (010)					⊥ (001)				
			Np	Nm	Ng	A	B	Np	Nm	Ng	A	B
Полевой шпат												
Меланократовые науйяиты	376-1	82	75,5	78	19	36	65	83	15	76	86	76
То же	376-1	83	74	82	17	34	65	82	13	80	89	77
» »	376-2	83	83	78	14,5	43	57	83	15	76	86	76
Науйяиты	315-2	80	73	82	18,5	33,5	68	82	13,5	79,5	89	77
»	315-2	82,5	71,5	82,5	20	31	67,5	85,5	11	80,5	87	80
»	315-2	83	69	83	22,5	28	70	86	11	80	86	80
Какортокиты	341	79	76	80	17	38	65	83	14	78	88	77
»	341	82	75	81	17,5	34,5	65	83	13	79	87	78

Полевой шпат

Меланократовые науйяиты	376	79,5	72	82	19	33	69	83	13,5	79	88	77,5
То же	313	82	72	81,5	20	32	67,5	85	12,5	79	86	79
» »	377	83	74	80	19	33,5	65	83,5	14	78	86	76,5
Науйяиты	313 *	76,5	75	82	17	37	67	84	12	80	88	79
Какортокиты	346 *	76,5	77	82	15	39,5	65,5	82,5	12,5	80,5	90	78
Пуласкиты	335-2*	79	80	82	13	40,5	61	84	11	81	88	79,5
»	335-1	83,5	71	80	22	31	68	82	16	77	87	75
Фойяиты	304 *	83,5	71	83	20,5	30,5	68	83	13	79,5	89	77,5
»	304 *	83,5	70	81	22	30	68	84	13	79	87	78

Примечание. * Звездочкой выделены микропергиты.

максимальный микроклин со специфическим «шахматным» типом двойникования в гомогенных образованиях или с полосчатыми, веретенообразными, вытянутыми по (010) двойниками в перлитах. Полученные константы хорошо согласуются с данными Бёггильда (Böggild, 1953) и Соренсена (Sørensen, 1962).

Определенный интерес представляет генетическая интерпретация полученных данных.

Обращает на себя внимание то, что как микропертиты, так и гомогенные калишпаты встречаются в одном и том же типе пород (например, в

Таблица 3

Рентгеновская триклинность (Δ_p) и содержание натриевого компонента в виде твердого раствора в калишпатовой фазе по рентгенографическим данным в щелочных полевых шпатах массива Илимаусак

Комплекс пород	№ обр.	$2\theta_{131-131}$	Δ_p	$2\theta_{201}$	NaAlSi ₃ O ₈ , мол. %
Полевой шпат из пегматита					
в меланократовых науйяитах	376	45,5'	0,99	20°56'	0,0
то же	313	45,0	0,98	20 55	0,0
в науйяитах	377	46,0	1,00	20 57	0,0
в пуласкитах	335	43,0	0,93	20 57	0,0
в фойяитах	304	45,0	0,98	20 56	0,0

Таблица 2

полевых шпатах массива Илимаусак, Гренландия

Np		Nm		Ng		A		B		Углы погасания		
+λ	+φ	-λ	-φ	+λ	-φ	-λ	+φ	+λ	-φ	на (010)	на (001)	⊥ [100]

из пород

7,0	15	80	12	46	71	6	54	15	25	4,5	14,5	16
8,5	16	80	8	36	73	1	56	14	25	6,5	15,0	16
7,0	7	82	12	65	75,5	5	47	16	33	5,5	7,0	14
8,5	16,5	81,5	7,5	34	71,5	0,5	56,5	13,5	22	6,5	17,0	14
5,0	18,5	82,5	7,5	28	70	6	59	10,5	22,5	2,0	18,0	13
4,5	21	83	7	25	67,5	6	62	10	20	2,0	21,5	14
7,0	14	80	10	45	73	2	52	14	25	6,0	13,0	16
7,0	15	81	9	36	72,5	3,5	55,5	13	25	5,0	15,0	14

из пегматитов

7,5	17,5	80	8	32	71	2	57	13	21	5,5	17,5	14
5,5	18	82	8,5	33	70	6	58	11,5	22,5	2,7	18,0	14
6,5	16	81	10	40	71	6,5	56,5	14	25	4,0	16,0	16
6,0	15	82	8	35	73	2	53	12	22,5	5,0	15,0	13
7,5	13	81	8	37	75	0	50,5	13	24,5	6,5	13,0	13
6,0	10	83	8	45	77	2	49,5	11,5	29	5,0	10,5	10
8,0	19	78	10	40	68	6	59	16	22	5,0	18,5	19
7,5	18,5	80	7	30	69,5	2	59,5	13	22	5,5	19,0	15
6,5	19,5	81	9	31	68	6	60	13	22	3,5	19,0	16

пудаскитах, в которых установлены даже антипертиты с наиболее высоким содержанием альбитовой составляющей), т. е. между типом пород и K/Na-соотношением в полевых шпатах нет строгой корреляции. И тот и другой тип микроклинов встречается как в пегматитах, так и во вмещающих их породах, но полевой шпат пегматитов чаще оказывается микроклин-пертитом (см. табл. 2). Наконец, пертитовый альбит неравномерно распределен в зернах полевого шпата и концентрируется обычно в периферических их частях. Последнее обстоятельство подчеркивалось также Фергюсоном (Ferguson, 1964). Обычно подобные соотношения интерпретируются как замещение калишпата альбитом (пертиты замещения). Однако их можно объяснить и как результат выноса пертитового альбита из блок-кристалла в процессе собирательной перекристаллизации продуктов распада полевошпатового твердого раствора. Мы полагаем, что при мощном автотематическом изменении нефелиновых сиенитов в конечную стадию их формирования под воздействием растворов высокой щелочности (свидетельство чему — широкое развитие в этих породах содалита и цеолитов, которые, кстати, замещают полевые шпаты) подобный процесс мог иметь место. По-видимому, конечным результатом этого процесса и явилось преобразование микропертитов в гомогенные калишпаты.

Специфической чертой полевых шпатов массива Илимаусак является наличие «шахматного» типа двойникования. Развитие максимальных микроклинов с «шахматным» типом двойникования (вместо обычного для микроклинов «решетчатого» типа) — характерная особенность многих агапитовых нефелиновых сиенитов. Кроме массива Илимаусак (Ussing, 1894; Bøggild, 1953; Sørensen, 1962, Ferguson, 1964) они описаны из Лангезундфюрда в Норвегии (Brøgger, 1890), из Ловозерского (Власов и др.,

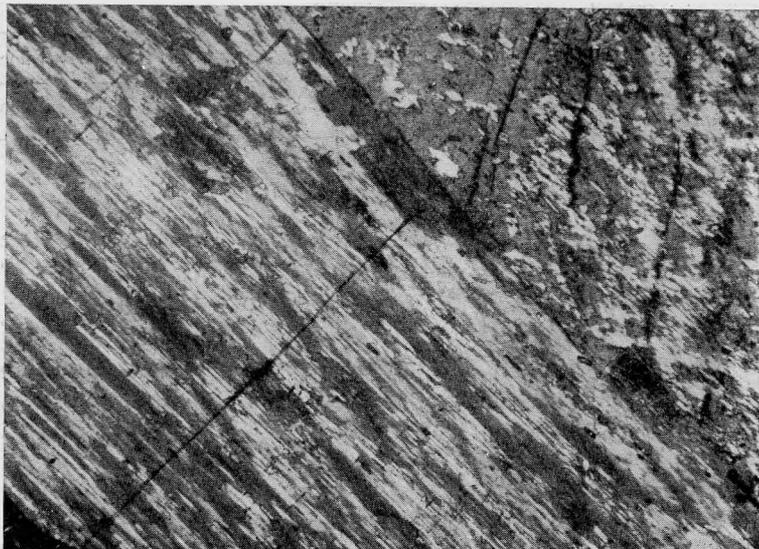


Рис. 3. Микроклин-микрпертит из пегматита в науянитах. Обр. 377, увел. 46, николи \perp . Зерно в нижнем левом углу ориентировано \perp [100]. Трещины спайности по (001). Видны полисинтетически сдвойникованные пертиты, вытянутые перпендикулярно трещинам спайности (белое с тонкими черными полосами), и вытянутые в том же направлении двойники в калиевой фазе (черное и светло-серое)

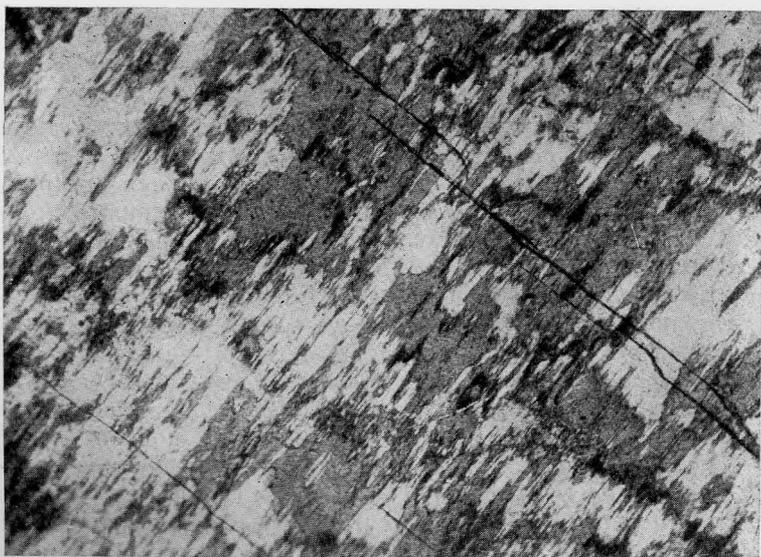


Рис. 4. «Шахматный» тип двойникования в гомогенных калишпатах из пегматита в меланократовых науянитах. Обр. 376, увел. 30, николи \perp . Разрез \perp [100]

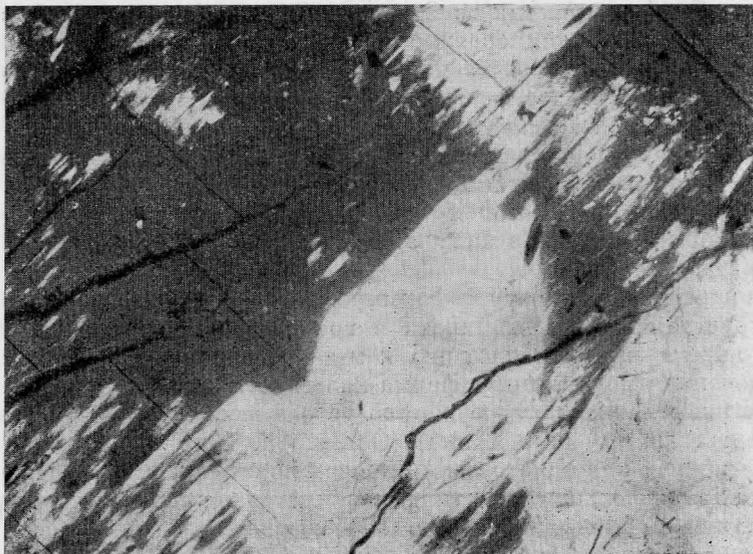


Рис. 5. «Шахматный» тип двойникования в гомогенных калишпатах из пегматита в науянтах. Участки с наиболее крупными двойниковыми индивидами. Обр. 315-2, увел. 30, николи +. Разрез \perp [100]



Рис. 6. «Шахматный» тип двойникования в гомогенных калишпатах из пегматита в меланократовых науянтах. Участки с двойниковыми индивидами, имитирующими альбитовые двойники роста. Обр. 376-2, увел. 46, николи +. Разрез \perp [100]

1959) и из Хибинского (Воробьева, 1937) массивов на Кольском полуострове и других аналогичных образований. Барт (Barth, 1959), рассматривая подобный микроклин из Стоа, приходит к выводу об образовании его при такой низкой температуре (ниже 300°), когда калишпат должен кристаллизоваться непосредственно в триклинной форме. Согласно Соренсену (Sørensen, 1962), распространившему вывод Барта (Barth, 1959) на микроклины массива Илимаусак, кристаллизация их имела место при низкой температуре непосредственно в форме максимального микроклина, что находится в соответствии с петрологической эволюцией пород массива, богатых щелочами и летучими компонентами, температура кристаллизации которых в силу этого должна быть значительно пониженной.

Однако низкая температура формирования пород еще не свидетельствует о кристаллизации калишпата в триклинной форме. Известно, что полевые шпаты имеют тенденцию к метастабильной кристаллизации и неупорядоченная моноклинная форма калишпата (санидин) может возникнуть при низкой температуре в поле устойчивости упорядоченного триклинного калишпата (микроклина) (Goldsmith, 1953). Наблюдения над кристаллизацией калишпатов в природе показывают, что даже среди аутигенных полевых шпатов санидин является не менее (если не более) обычным, чем микроклин (Baskin, 1956).

Согласно Лавесу (Laves, 1950), типичное решетчатое двойникование (полисинтетическое) по альбит-периклиновому закону (\perp (010) альбитовых двойников = [010] периклиновых) возникает из моноклинного состояния и наблюдается не в процессе роста, а в результате превращений в твердом состоянии. Для аутигенных максимальных микроклинов, которые кристаллизовались непосредственно в триклинной форме, характерно альбит-периклиновое двойникование другого типа. Для них описаны «четверники», связанные альбит-периклиновым двойникованием, с отчетливо триклинной морфологией и необычным соотношением рефлексов от альбитовых и периклиновых положений на рентгенограммах (Baskin, 1956). Аналогичные альбит-периклиновые четверники установлены И. Т. Бакуменко и Ю. А. Долговым (1966) для микроклина, нарастающего на кристаллах низкотемпературного кварца. Температура его кристаллизации $140-175^{\circ}$ (по гомогенизации включений в кварце). Отмечается, что двойниковые оси \perp (010) и [010] для альбитовых и периклиновых двойников практически совпадают, но, к сожалению, эти четверники не изучены рентгенографически. «Шахматный» тип двойникования интерпретируется изучавшими его исследователями (Ussing, 1894; Bøggild, 1953, и др.) как эффект прорастания двойников по альбитовому закону. Рентгенографически он также не изучен. Соренсен (Sørensen, 1962) проводит аналогию между «шахматным» типом двойникования и четверниками по альбитовому и периклиновому закону, наблюдавшимися для аутигенных полевых шпатов. Однако, по нашему мнению, для отождествления этих типов двойников нет достаточных оснований.

Согласно Гольдсмит и Лавесу (Goldsmith, Laves, 1954₂) наличие альбитового полисинтетического двойникования не является доказательством кристаллизации калишпата в триклинной форме, так как он может возникнуть и из первоначально моноклинного состояния. Таким образом, вопрос о форме кристаллизации калишпатов в породах массива Илимаусак и аналогичных образований из других агпайтовых нефелиновых сиенитов, которые в настоящее время представляют собой максимальные микроклины со специфическим «шахматным» типом двойникования, не может считаться решенным. Его можно было бы решить, уточнив морфологию кристаллов калишпата данного типа. Кристаллизация непосредственно в триклинной форме была бы доказана, если было бы найдено соответствующее отклонение углов $\alpha^* = (010) : (001)$ и $\gamma^* = (010) : (100)$ от 90° , как это было показано Бёггильдом (Bøggild, 1953) для поздней генерации калишпа-

тов из месторождения Ивигтут, или были бы обнаружены альбитовые или периклиновые двойники роста.

Необходимо заметить, что альбитовые двойники для калишпатов из пород массива Илимаусак отмечались в литературе. Например, Фергусоном (Ferguson, 1964) альбитовые и манебахские двойники наблюдались в содалитовых фойяитах, какортокитах и луявритах. Однако детального описания, из которого следовало бы, что установлены действительно двойники роста, не приводится. В отношении наблюдавшихся нами альбитовых двойников, подобных тем, что изображены на рис. 6, нет уверенности, что это двойники роста, так как они связаны постепенными переходами с «шахматным» типом двойникования. Такие двойники могли возникнуть и в твердом состоянии при достаточно полной собирательной перекристаллизации мелких двойниковых индивидов «шахматного» типа.

ЛИТЕРАТУРА

- Бакуменко И. Т., Долгов Ю. А. О низкотемпературном микроклине.— Сб. «Материалы по генетической и экспериментальной минералогии», т. 4. Изд-во СО АН СССР, 1966.
- Власов К. М., Кузьменко М. В., Еськова Е. М. Ловозерский щелочной массив. Изд-во АН СССР, 1959.
- Воробьева О. А. Микроклин.— Сб. «Минералы Хибинских и Ловозерских тундр». Изд-во АН СССР, 1937.
- Марфуни А. С. Полевые шпаты — фазовые взаимоотношения, оптические свойства, геологическое распределение. Изд-во АН СССР.— Труды ИГЕМ АН СССР, вып. 78. Изд-во АН СССР, 1962.
- Васкин Y. A study of authigenic feldspars.— J. Geol., 1956, 64, N 2.
- Barth T. F. W. The interrelations of the structural variants of the potash feldspars.— Z. Krist., 1959, Bd 112.
- Böggild O. B. The mineralogy of Greenland.— Medd. om Grönland, 1953, Bd 149, N 3.
- Bowen N. L., Tuttle O. F. The system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{H}_2\text{O}$.— J. Geol., 1950, 58, N 5.
- Brögger W. C. Die Mineralien der Syenitpegmatitgänge der Südnorwegischen Augit- und Nephelinsyenite.— Z. Krist., 1890, Bd. 16.
- Ferguson J. Geology of the Ilimaussaq alkaline intrusiv South Greenland.— Medd om Grönland, 1964. Bd 172, N 4.
- Goldsmith J. R. A. «simplicity principle» and its relation to «ease» of crystallization.— J. Geol., 1953, 61.
- Goldsmith J. R., Laves F. 1. The microcline — sanidine stability relations.— Geochim. et Cosmochim. Acta. 1954, 5.
- Goldsmith J. R., Laves F. 2. Potassium feldspars structurally intermediate between microcline and sanidine.— Geochim. et Cosmochim. Acta. 1954, 6.
- Kuellermer F. J. X-ray intensity measurements on perthitic materials. I. Theoretical considerations, 1959, 67, N 6.
- Laves F. The lattice and twinning of microcline and other potashfeldspars.— J. Geol., 1950, 58, N 5.
- Sørensen H. On the occurrence of steenstrupine in the Ilimaussaq massif Southwest Greenland.— Medd. om Grönland, 1962, Bd 167, N 1.
- Ussing N. V. Mineralogisk-petrografiske Undersøgelser af Grønlandske Nefelinsyeniter. Første Del: Alkalifeldspaterne.— Medd. om Grönland., 1894, Hf. 14.