

УДК 552:[549.618.3+549.618.6]  
DOI 10.17513/use.38323

## ТЕМПЕРАТУРА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНИТОВ ТУРОЧАКСКОГО ГРАНОСИЕНИТ-ГРАНИТ-ЛЕЙКОГРАНИТОВОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ЭПИДОТА

**Наставко Е.В., Змеев Б.Ю., Федосюк Г.А.**

*ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово,  
e-mail: evnastavko@yandex.ru*

Цель исследования заключается в определении температуры кристаллизации гранитов и изменения состава расплава в процессе кристаллизации, посредством изучения химического состава минералов группы эпидота. В статье представлены результаты исследования состава минералов группы эпидота из порфировидных гранитов турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса ( $\gamma D_1 t$ ). Материалом для исследований послужили граниты турочакского комплекса, отобранные из коренных выходов гранитов горы Большой Иконостас (Республика Алтай). Химический состав минералов изучен при помощи сканирующей электронной микроскопии, которая проводилась с использованием микроскопа Tescan Vega3 (Чехия), оснащенного приставкой рентгенофлуорисцентного энергодисперсионного анализа Oxford Instruments (Великобритания) с программой управления Aztec One. В рамках исследования акцессорной минерализации обнаружено, что в породах присутствуют разные минералы группы эпидота: алланит-(Ce) и эпидот. Алланит приурочен к лейстам биотита, зерна зональны, центр зерна сложен алланитом-(Ce), кайма – редкоземельным эпидотом. Для него характерно наличие легких редкоземельных элементов: La, Ce и Nd, а также Y. В составе алланита-(Ce) и редкоземельного эпидота церий преобладает над лантаном. Эпидот образует призматические зерна и их скопления в кварц-полевошпатовой основной массе. Редкоземельные элементы в нем отсутствуют. Для него типично повышенное содержание глинозема, состав единичных анализов располагается близко к границе с клинозоизитом. Наличие разных по составу минералов группы эпидота отражает эволюцию расплава в процессе кристаллизации.

**Ключевые слова:** эпидот, алланит-(Ce), гранит, Республика Алтай

## CRYSTALLIZATION TEMPERATURE OF GRANITES OF THE TUROCHAK GRANOSYENITE-GRANITE-LEUCOGRANITE COMPLEX BASED ON THE STUDY OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF EPIDOTE GROUP MINERALS

**Nastavko E.V., Zmeev B.Yu., Fedosyuk G.A.**

*Kemerovo State University, Kemerovo, e-mail: evnastavko@yandex.ru*

The aim of the study is to determine the crystallization temperature of granites and changes in the composition of the melt during crystallization by studying the chemical composition of epidote group minerals. The article presents the results of a study of the composition of epidote group minerals from porphyritic granites of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex ( $\gamma D_1 t$ ). The material for the research was granites of the Turochak complex, selected from the primary granite outcrops of Mount Bolshoi Iconostasis (Altai Republic). The chemical composition of the minerals was studied using scanning electron microscopy, which was carried out using a Tescan Vega3 microscope (Czech Republic) equipped with an Oxford Instruments (UK) X-ray fluorescence energy dispersive analysis attachment with the Aztec One control program. As part of the study of accessory mineralization, it was discovered that the rock contains different minerals of the epidote group: allanite-(Ce) and epidote. Allanite is confined to biotite laths, the grains are zonal, the center of the grain is composed of allanite-(Ce), and the rim is composed of rare-earth epidote. It is characterized by the presence of light rare earth elements – La, Ce and Nd, as well as Y. In the composition of allanite-(Ce) and rare earth epidote, cerium predominates over lanthanum. Epidote forms prismatic grains and their clusters in the quartz-feldspathic groundmass. There are no rare earth elements in it. It is typically characterized by a high alumina content; the composition of individual analyzes is located close to the boundary with clinozoisite. The presence of epidote group minerals of different compositions reflects the evolution of the melt during crystallization.

**Keywords:** epidote, allanite-(Ce), granite, Altai Republic

### Введение

Минералы группы эпидота являются типичными акцессориями изверженных, метаморфических и метасоматических пород. Наиболее распространенными минералами данной группы являются эпидот, клинозоизит и алланит (ортит). Клинозоизит и эпидот являются характерными минералами пород зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций регионального метаморфиз-

ма, а также скарнов. Стронциевые эпидот и клинозоизит обнаружены в метагаббро [1] и в щелочных породах тешенитовой ассоциации [2] Западных Карпат. На территории Российской Федерации интересна находка стронциевого эпидота и редкого ниигатаита в родингитах Баженовского офиолитового массива на Среднем Урале [3]. В зависимости от преобладающего в составе алланита редкоземельного элемента

(РЗЭ) выделяют алланит-(Y) и алланит-(Ce). Последний является типичным магматическим минералом, образующимся в диапазоне температур 850-790 °С [4], тогда как алланит-(Y) является более редким и появляется на поздней стадии кристаллизации остаточного богатого флюидами субщелочного гранитного расплава. Большое количество работ посвящено алланиту из гранитных пегматитов Урала [5; 6] и Алтая [7], в меньшей степени из сиенитовых пегматитов Урала [8]. Также алланит-(Ce) описан в породах основного и ультраосновного состава западного склона Южного Урала [9]. Уникальным является сонахождение антагонистов алланита-(Ce) и алланита-(Y) в турмалинитах Северного гранитного массива на Чукотке [10], поскольку, как правило, они приурочены к разным формационным типам гранитоидов [11]. Метасоматический эпидот может служить индикатором тектонических процессов [12]. Состав минералов данной группы часто служит индикатором глубинности гранитных пег-

матитов [13]. В полиформационных золото-серебряных рудах золото-серебряного месторождения Роговик (Омсукчанский рудный район, Северо-Восток России) был обнаружен нетипичный для вулканогенных золото-серебряных руд ортит [14]. Его нахождение в рудах авторы связывают с влиянием процессов гранитоидного магматизма при их формировании. На это указывает повышенное содержание редкоземельных элементов (суммарно РЗЭ достигают 100 г/т и более) и фтора (до 2000 г/т) в рудах.

**Цель исследования** состоит в определении температуры кристаллизации гранитов и изменения состава расплава в процессе их кристаллизации посредством изучения химического состава минералов группы эпидота.

**Материалы и методы исследования**

Материалом для исследований послужили образцы горных пород из коренных выходов гранитов горы Большой Иконостас (50°24'58,08" N, 82°26'05,78" E), Республика Алтай (рис. 1).

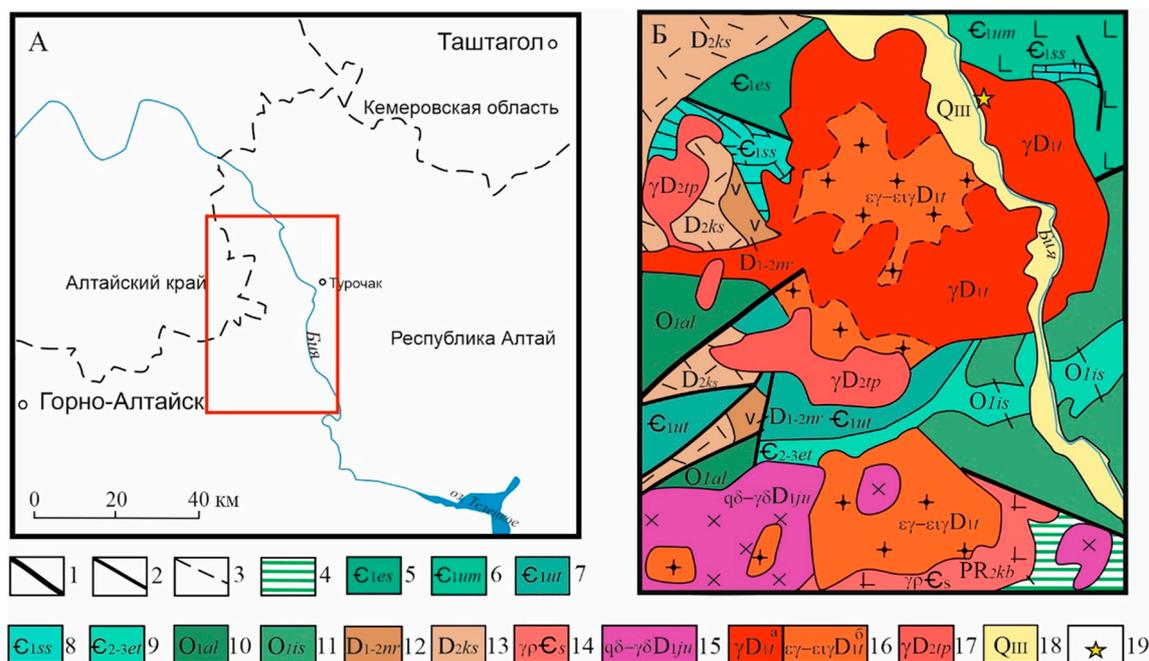


Рис. 1. Схема расположения (А) и строения (Б) турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса: 1-3 – разрывные нарушения; 1-2 – достоверные; 1 – главные, 2 – прочие; 3 – предполагаемые; 4 – кебезенский плагигнейсово-амфиболитовый комплекс; 5 – эсконгинская свита, 6 – усть-анзаскоманжерокская свита; 7 – убинско-тырганская группа свит; 8 – сийская терригенно-карбонатная свита; 9 – еландинско-тандошинская группа свит; 10 – алзасская свита; 11 – иипинская свита; 12 – нырнинская свита, 13 – кротинско-саганская группа свит; 14 – саракокишинский диорит-тоналит-плагιοгранитовый комплекс, 15 – югалинский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс; 16 – турочакский граносиенит-гранит-лейкогранитовый комплекс (а – порфировидные биотитовые граниты и лейкограниты, граносиениты, аляскиты, аплитовидные граниты, б – порфировидные биотитовые умереннощелочные граниты и лейкограниты); 17 – топольнинский диорит-гранодиоритовый комплекс; 18 – озерно-аллювиальные четвертичные отложения; 19 – место отбора проб

Всего отобрано 10 образцов порфиroidных гранитов горы Большой Иконостас. Девять образцов отобраны непосредственно на горе по трем линиям, расстояние между отобранными образцами составило от 50 до 75 м в зависимости от задернованности и выходов пород на дневную поверхность. Расстояние между линиями от 35 до 50 м. Один образец отобран у подножия горы на границе с р. Бией.

В 8 образцах обнаружено сонахождение разных минералов группы эпидота. В двух оставшихся образцах найдены только алланит с каймой из редкоземельного эпидота. Отсутствии собственно эпидота, по всей видимости, обусловлено тем, что он слагает гнездообразные скопления, которые неравномерно распределены в крупнозернистой кварц-полевошпатовой основной массе породы и просто не попали в изучаемый срез.

Суммарно исследован химический состав 42 зерен, из них 22 зерна алланита с каймой из редкоземельного эпидота (44 анализа), оставшиеся 20 зерен – эпидот из кварц-полевошпатовой основной массы (33 анализа). Таким образом, всего было проанализировано 77 анализов химического состава минералов.

Исследование химического состава минералов было проведено при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), с использованием микроскопа Tescan Vega 3 (Чехия), оснащенного приставкой рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) Oxford Instruments (Великобритания) с программой управления Aztec One. Ускоряющее напряжение для СЭМ-съемки и анализа составило 20 кВ.

Последующие кристаллохимические пересчеты минералов группы эпидота выполнялись на восемь катионов. Для получения коэффициента корреляции между содержанием различных элементов было выполнено построение корреляционной матрицы в программе Excel по 77 анализам. При высокой и весьма высокой тесноте связи установление ее достоверности оценивалось при помощи  $t$ -критерия и уровня значимости  $p$ .

#### *Геологическая характеристика турочакского комплекса*

Геологическая характеристика комплекса далее дана согласно объяснительной записке к Государственной геологической карте Российской Федерации, лист N-45 – Новокузнецк [15].

Турочакский граносиенит-гранит-лейкогранитовый комплекс ( $\gamma D_1 t$ ) представлен

северным окончанием Чеборской интрузии и петротипическим Турочакским массивом трехфазного строения [15, с. 147], форма последнего близка к изометричной.

Породы первой и второй фаз внедрения составляют примерно по 5%, оставшиеся 90% приходятся на породы третьей фазы [15, с. 147]. Породы первой фазы представлены мелко-среднезернистыми биотитовыми и амфибол-биотитовыми меланогранитами, граносиенитами и гранодиоритами, вторая фаза сложена порфиroidными биотитовыми умереннощелочными гранитами [15, с. 147]. Породы третьей фазы представлены неравномернозернистыми, порфиroidными и аплитовидными биотитовыми, биотит-мусковитовыми лейкогранитами, умереннощелочными гранитами, аляскитами и гранит-порфирами [15, с. 148].

Меланограниты первых двух фаз внедрения сконцентрированы в центральной части плутона, от центра к краю они сменяются субщелочными лейкогранитами, далее лейкогранитами нормального ряда третьей фазы, которые слагают широкие периферические части [15, с. 148].

Лейкограниты третьей (основной) фазы характеризуются широкими структурными вариациями от средне-крупнозернистых и крупнопорфиroidных разновидностей до аплитовидных лейкократовых гранитов, гранофиоров и гранит-порфиоров с повышенным содержанием кварца (30–35%, в аляскитах – до 50%). В отличие от пород предыдущих фаз, в породах третьей фазы отмечается отсутствие амфибола, преобладание биотита над мусковитом и присутствие последнего, а также преобладание калиевого полевого шпата над кислым плагиоклазом [15, с. 148]. Также для гранитов третьей фазы характерно разнообразие акцессорных минералов, с преобладанием магнетита, ильменита, титанита, апатита и циркона. Отмечено спорадическое присутствие граната, ортита и монацита [15, с. 148].

Возраст, установленный U-Pb методом по цирконам порфиroidных биотитовых гранитов Турочакского массива горы Большой Иконостас, составил  $390 \pm 6$  млн лет, а умереннощелочных гранитов горы Цаган –  $400 \pm 4$  млн лет [15, с. 148], и принят как раннедевонский.

В 2023 г. авторами пройдены маршруты по г. Большой Иконостас с целью отбора проб гранитов. Территория существенно задернована, коренные выходы пород встречаются спорадически. В пределах г. Большой Иконостас обнаружены только лейкократо-

вые порфиroidные граниты третьей фазы внедрения. Породы светло-розовые до розовых за счет обилия интенсивно окрашенных зерен калиевого полевого шпата. Структура гранитов варьирует от среднезернистой до крупнозернистой, по взаимоотношению зерен гипидиоморфнозернистая. Текстура пород – массивная. Минеральный состав достаточно устойчив. Основная масса гранитов сложена калиевым полевым шпатом (35-40%), плагиоклазом (25-30%) и кварцем (25-30%), темная слюда составляет до 10%. Акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом и минералами группы эпидота. Вторичные преобразования пород выражаются, главным образом, развитием хлорита по слюде, а также незначительной соссуритизацией плагиоклаза.

**Результаты исследования и их обсуждение**

При исследовании минерального состава 8 образцов порфиroidных гранитов установлено наличие разных по своему со-

ставу и морфологии минералов группы эпидота. В сводной по всем 8 образцам таблице 1 продемонстрированы вариации состава минералов и среднее значение. Видно, что для всех минералов характерны существенные колебания содержания глинозема и кальция. Кроме этого, в составе эпидота существенно варьирует содержание железа, в меньшей мере марганца, а в алланите-(Ce) и редкоземельном эпидоте (REE-эпидот) максимальные колебания характерны для редкоземельных элементов.

Таблица 1 наглядно демонстрирует вариации исследуемых минералов. Исходя из большого количества выполненных определений (77), нет смысла приводить расчеты и формулы по всем анализам. В связи с этим в таблице 2 для алланита и редкоземельного эпидота приводятся составы, формульные коэффициенты и кристаллохимические формулы максимально отличающихся определений, а для эпидота – максимально отличающихся определений и значений близких к наиболее часто встречающимся.

**Таблица 1**

Вариации химического состава минералов группы эпидота в гранитах турочакского комплекса

Эл-ты, масс. %	Алланит-(Ce) (22 анализа)	REE-эпидот (22 анализа)	Эпидот (33 анализа)
SiO <sub>2</sub>	$\frac{34,55 - 35,91}{35,25}$	$\frac{36,88 - 37,53}{37,12}$	$\frac{38,28 - 39,19}{38,78}$
TiO <sub>2</sub>	0	$\frac{0 - 0,71}{0,16}$	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{19,75 - 21,64}{20,77}$	$\frac{20,62 - 24,48}{21,04}$	$\frac{23,66 - 27,14}{25,67}$
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{3,17 - 4,76}{3,99}$	$\frac{1,99 - 3,30}{2,66}$	0
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{5,66 - 8,62}{7,00}$	$\frac{3,66 - 5,29}{4,65}$	0
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{1,42 - 3,16}{2,20}$	$\frac{0,83 - 1,16}{1,06}$	0
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{1,27 - 2,88}{2,06}$	0	0
FeO	$\frac{11,93 - 12,12}{12,01}$	$\frac{13,36 - 13,39}{13,37}$	$\frac{9,57 - 14,02}{11,31}$

Окончание табл. 1

Эл-ты, масс. %	Алланит-(Се) (22 анализа)	REE-эпидот (22 анализа)	Эпидот (33 анализа)
MnO	$\frac{2,86 - 4,09}{3,46}$	$\frac{1,21 - 1,39}{1,33}$	$\frac{0,29 - 2,31}{1,34}$
CaO	$\frac{11,86 - 14,34}{13,27}$	$\frac{17,99 - 19,21}{18,59}$	$\frac{21,72 - 23,74}{22,91}$
Σ PЗЭ	$\frac{10,25 - 16,54}{13,18}$	$\frac{6,48 - 9,75}{8,38}$	0

Таблица 2

Химический состав минералов группы эпидота в гранитах турочакского комплекса

Образец Эл-ты, масс. %	B2		B5		B2	B3	B5	B6	B8
	ц	кр	ц	кр					
SiO <sub>2</sub>	34,55	36,88	35,91	37,53	39,09	38,75	39,19	38,28	39,16
TiO <sub>2</sub>	0	0	0	0,71	0	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,75	20,62	21,64	21,48	27,14	27,08	25,39	23,66	23,96
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,76	3,3	3,17	1,99	0	0	0	0	0
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,62	5,29	5,66	3,66	0	0	0	0	0
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,16	1,16	1,42	0,83	0	0	0	0	0
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,27	0	2,88	0	0	0	0	0	0
FeO	11,93	13,36	12,12	13,39	9,57	10,17	11,4	14,02	12,86
MnO	4,09	1,39	2,86	1,21	1,31	1,75	0,29	2,31	0,35
CaO	11,86	17,99	14,34	19,21	22,89	22,25	23,74	21,72	23,67
Формульные единицы в пересчете на 8 катионов									
Si	3,05	3,06	3,11	3,05	2,99	2,97	3,00	2,97	3,02
Ti	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	2,05	2,02	2,21	2,06	2,44	2,44	2,29	2,16	2,18
La	0,15	0,10	0,10	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ce	0,28	0,16	0,27	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nd	0,10	0,03	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Y	0,06	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ΣPЗЭ+Y	0,59	0,29	0,54	0,19	-	-	-	-	-
Fe	0,88	0,93	0,88	0,91	0,61	0,65	0,73	0,91	0,83
Mn	0,31	0,10	0,21	0,08	0,08	0,11	0,02	0,15	0,02
Ca	1,12	1,60	1,05	1,67	1,87	1,83	1,95	1,81	1,95
Кристаллохимические формулы									
$(Ca_{1,12}Ce_{0,28}La_{0,15}Nd_{0,10}Y_{0,06})_{1,71}(Al_{2,05}Fe_{0,88}Mn_{0,31})_{3,24}[Si_{3,05}O_{12}](OH)$ – алланит $(Ca_{1,60}Ce_{0,16}La_{0,10}Nd_{0,03})_{1,89}(Al_{2,02}Fe_{0,93}Mn_{0,10})_{3,05}[Si_{3,06}O_{12}](OH)$ – редкоземельный эпидот $(Ca_{1,05}Ce_{0,27}La_{0,10}Nd_{0,04}Y_{0,13})_{1,69}(Al_{2,21}Fe_{0,88}Mn_{0,21})_{3,30}[Si_{3,11}O_{12}](OH)$ – алланит $(Ca_{1,67}Ce_{0,11}La_{0,06}Nd_{0,02})_{1,86}(Al_{2,06}Fe_{0,91}Mn_{0,08}Ti_{0,04})_{3,09}[Si_{3,05}O_{12}](OH)$ – редкоземельный эпидот $(Ca_{1,87})_{1,87}(Al_{2,44}Fe_{0,61}Mn_{0,08})_{3,13}[Si_{2,99}O_{12}](OH)$ – эпидот $(Ca_{1,83})_{1,83}(Al_{2,44}Fe_{0,65}Mn_{0,11})_{3,21}[Si_{2,97}O_{12}](OH)$ – эпидот $(Ca_{1,95})_{1,95}(Al_{2,29}Fe_{0,73}Mn_{0,02})_{3,04}[Si_{3,00}O_{12}](OH)$ – эпидот $(Ca_{1,81})_{1,81}(Al_{2,16}Fe_{0,91}Mn_{0,15})_{3,22}[Si_{2,97}O_{12}](OH)$ – эпидот $(Ca_{1,95})_{1,95}(Al_{2,18}Fe_{0,83}Mn_{0,02})_{3,03}[Si_{3,02}O_{12}](OH)$ – эпидот									

Примечание: ц – центр зерна, кр – край.

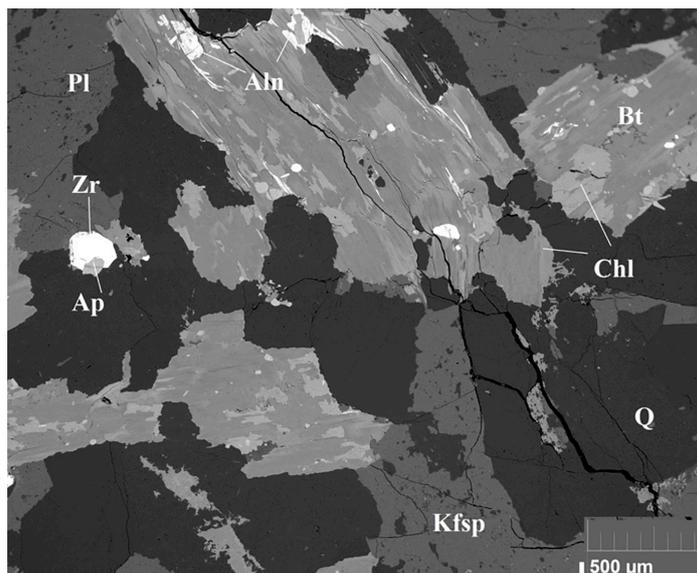


Рис. 2. Зерна алланиита-(Ce) (Aln) в лейстах хлоритизированного биотита (Bt) в граните (обр. В-2) турочакского массива. Ap – апатит, Chl – хлорит, Kfsp – калиевый полевой шпат, Pl – плагиоклаз, Q – кварц, Zr – циркон

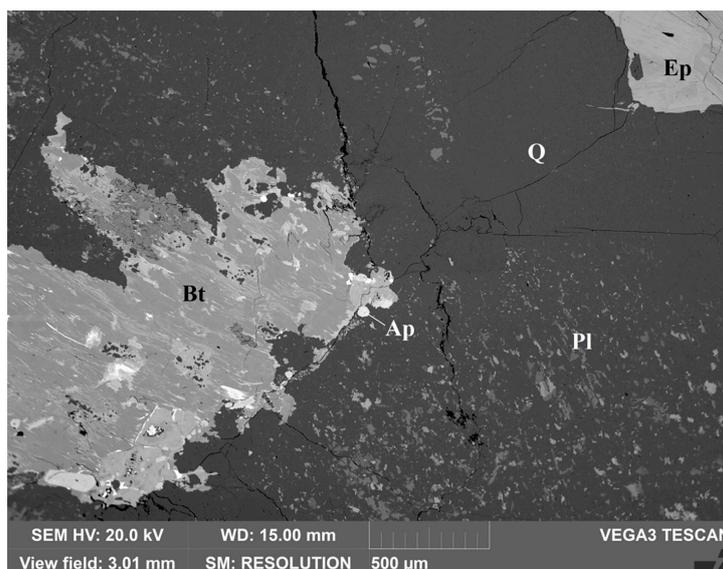


Рис. 3. Скопление зерен эпидота (Ep) в кварц-полевошпатовой основной массе гранита (обр. В-2) турочакского массива. Ap – апатит, Bt – биотит, Ep – эпидот, Pl – плагиоклаз, Q – кварц

Алланит-(Ce) и редкоземельный эпидот (REE-эпидот). К лейстам биотита приурочены мелкие, до 0,1 мм, зерна минерала группы эпидота, вокруг которого наблюдаются плеохраичные дворики, что наглядно представлено на рисунке 2.

Центральные части зерен в соответствии с номенклатурой [16] отвечают алланиту-(Ce). При пересчете на формульные коэффициенты суммарное количество РЗЭ с иттрием в центре зерен составляет 0,54-0,59 фор-

мульных единиц (ф. ед.), церий преобладает над лантаном ( $Ce_2O_3/La_2O_3=1,8$ ) и неодимом ( $Ce_2O_3/Nd_2O_3=2,7-4,0$ ). Краевые части зерен соответствуют REE-эпидоту, в котором суммарное количество РЗЭ составляет 0,19-0,29 ф. ед., иттрий отсутствует. В них, так же как и в центре зерен, церий преобладает над лантаном ( $Ce_2O_3/La_2O_3=1,6-1,8$ ), церий-неодимовое отношение повышено относительно центральных частей ( $Ce_2O_3/Nd_2O_3=4,4-4,6$ ).

Таблица 3

Корреляционная матрица состава минералов группы эпидота

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	Σ PЗЭ
SiO <sub>2</sub>	1										
TiO <sub>2</sub>	-0,04	1									
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0,84</b>	-0,27	1								
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>-0,97</b>	0,10	<b>-0,88</b>	1							
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>-0,97</b>	0,12	<b>-0,88</b>	<b>1,00</b>	1						
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,96	0,03	<b>-0,81</b>	<b>0,95</b>	<b>0,97</b>	1					
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,70	-0,17	-0,45	0,61	0,62	0,59	1				
FeO	-0,26	0,32	-0,68	0,27	0,26	0,16	-0,01	1			
MnO	<b>-0,85</b>	-0,16	-0,52	0,70	0,72	0,79	0,65	0,04	1		
CaO	<b>1,00</b>	-0,05	<b>0,81</b>	<b>-0,96</b>	<b>-0,97</b>	<b>-0,95</b>	-0,75	-0,20	<b>-0,85</b>	1	
Σ PЗЭ	<b>-0,98</b>	0,10	<b>-0,87</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,97</b>	0,62	0,25	0,73	<b>-0,97</b>	1

*Эпидот.* В отличие от алланита-(Ce) эпидот представлен крупными призматическими зернами размером 0,5-1,0 мм (рис. 3), образующими скопления в кварц-полевошпатовой основной массе. Эпидот идиоморфен относительно кварца и полевых шпатов. Для минерала характерна аномальная сизо-серая интерференционная окраска. В составе минерала обнаруживается повышенное содержание глинозема, состав единичных анализов (5 и 6) располагается близко к границе с клиноцоизитом.

Для всех минералов характерно наличие пьмонтитового минала, максимальное содержание марганца обнаружено в алланите-(Ce) и достигает 2,86-4,09 мас. %.

Корреляционная матрица (табл. 3) демонстрирует высокую и весьма высокую тесноту связи между рядом элементов.

Весьма высокая теснота связи обнаружена между кремнеземом и редкоземельными элементами, а также их суммой ( $r = -0,96-0,98$ ), а также между кальцием и PЗЭ и, соответственно, их суммой ( $r = -0,95-0,97$ ). Между содержанием глинозема и PЗЭ и их суммой проявлена высокая теснота связи ( $r = -0,81-0,88$ ). Во всех случаях корреляционная связь является статистически значимой ( $p < 0,001$ ).

Взаимоотношение минералов и их химический состав позволяют сделать следующие выводы:

1) с началом процесса кристаллизации в граните таких минералов, как апатит, циркон, алланит-(Ce) и биотит, происходит резкое уменьшение содержания редких и редкоземельных элементов, а также железа и магния, соответственно, оставшаяся часть

богата глиноземом, кремнеземом, а также калием, кальцием и натрием и содержит незначительное количество железа, магния и марганца;

2) последующая кристаллизация эпидота приводит к тому, что расплав обедняется магнием, железом и марганцем;

3) остаточный расплав обогащен кремнеземом, глиноземом, натрием, кальцием и калием, что и приводит к кристаллизации на заключительной стадии кварц-полевошпатовой основной массы.

Известно, что кристаллизация гранитов идет в диапазоне 900-600°C, при этом начало кристаллизации возможно при любой температуре в данном диапазоне. Температура кристаллизации алланита-(Ce) возможна в диапазоне 850-790°C. Поскольку кристаллизация гранита начинается с алланита, апатита и циркона, соответственно, температура начала процесса кристаллизации гранита составляет 850-790°C.

### Заключение

Проведенные исследования позволили выделить в гранитах турочакского комплекса два различных минерала группы эпидота. Первый представлен мелкими зернами алланита-(Ce), приуроченными к лейстам биотита, для которого характерно максимальное содержание редкоземельных элементов 10,25-16,54 мас. % и наличие иттрия (1,27-2,88 мас. %), что составляет 0,54-0,59 формульной единицы. Краевая часть зерен по составу соответствует редкоземельному эпидоту, количество PЗЭ составляет 6,48-9,75 мас. % и не превышает 0,29 формульной единицы. Второй пред-

ставитель группы по своему составу соответствует эпидоту, отдельные анализы близки к границе эпидота и клиноцоизита. Отмечено, что для минералов группы эпидота характерна высокая и весьма высокая статистически значимая корреляционная связь в парах РЗЭ – кремнезем, РЗЭ – глинозем и РЗЭ – кальций. Наличие двух различных по составу минералов группы эпидота и взаимоотношения минералов в полной мере отражают изменение состава расплава в процессе кристаллизации гранита и позволяют уточнить температуру начала кристаллизации породы, которая составила 850-790 °С.

### Список литературы

1. Radvanec M., Németh Z. Variscan epidote-eclogite, blueschists and pumpellyite-actinolite facies Cpx/Sr-rich epidote-metagabbro blocks exhumed in Carboniferous, with Permian amphibolite facies overprint (Gemeric unit, Western Carpathians) // *Mineralia Slovaca*. 2018. Vol. 50. No. 1. P. 55-99.
2. Kropáč K., Dolníček Z., Uher P., Buriánek D., Urubek T. Crystal chemistry and origin of epidote-(Sr) in alkaline rocks of the teschenite association (Silesian Unit, Outer Western Carpathians, Czech Republic) // *Mineralogy and Petrology*. 2024. Vol. 118, No. 1. P. 55-70. DOI: 10.1007/s00710-023-00847-w.
3. Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. О находке ниигатаита и эпидота-(Sr) в родингитах Баженовского офиолитового массива (Средний Урал) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 2. С. 42-49. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2024/2/42-49.
4. Broska I., Petřík I., Williams C.T. Coexisting monazite and allanite in peraluminous granitoids of the Tribec Mountains, Western Carpathians // *American Mineralogist*. 2000. Vol. 85. P. 22-32.
5. Губин В.А., Хиллер В.В. Акцессорные алланиты Адуйского гранитного массива (Средний Урал) // *Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества*. 2014. № 11. С. 12-16.
6. Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Кисин А.Ю. Ортит – основной акцессорный минерал редкоземельных пегматитов // *Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества*. 2019. № 16. С. 69-74.
7. Гусев А.И. Геохимия редкоземельных элементов в алланите Даниловского проявления Горного Алтая // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2023. № 1(53). С. 68-75. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-1-68-75.
8. Чердниченко С.В. Уран-торий-редкоземельные минералы в пегматитах Селянчинского сиенитового массива (Южный Урал) // *Записки Российского минералогического общества*. 2017. Т. 146. № 5. С. 80-91.
9. Ковалев С.Г., Ковалев С.С. Первые данные о Th-REE минерализации в магматических породах основного-ультраосновного состава западного склона Южного Урала // *Георесурсы*. 2023. Т. 25, № 1. С. 95-107. DOI 10.18599/grs.2023.1.10.
10. Алексеев В.И., Марин Ю.Б., Гембицкая И.М. Парагенезис алланита-(Y) и алланита-(Ce) в турмалинитах Северного массива (Чукотка) и соотношение иттрия и лантаноидов в алланите // *Записки Российского минералогического общества*. 2015. Т. 144, № 6. С. 83-93.
11. Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Акцессорная минерализация пород позднемеловых интрузивных серий с Li-F гранитами Дальнего Востока // *Записки Российского минералогического общества*. 2014. Т. 143, № 3. С. 1-22.
12. Щербакова Т.Ф., Терехов Е.Н., Куклей Л.Н. Метасоматический эпидот в апоамфиболитовых породах – индикатор тектонических процессов, связанных с экзгумацией пород Беломорского пояса (Петрография, Геохимия) // *Геохимия*. 2021. Т. 66, № 12. С. 1123-1135. DOI: 10.31857/S0016752521120050.
13. Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Кисин А.Ю., Савичев А.Н. Акцессорные минералы пород метаморфических комплексов как индикаторы глубинности // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2021. № 4(64). С. 43-54. DOI 10.21440/2307-2091-2021-4-43-54.
14. Кравцова Р.Г., Макшаков А.С., Павлова Л.А. Минералогия и состав, закономерности распределения и особенности формирования рудной минерализации золото-серебряного месторождения Роговик (Северо-Восток России) // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56, № 10. С. 1739-1759. DOI: 10.15372/GiG20151001.
15. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-45 – Новокузнецк. Объяснительная записка / под ред. Г.А. Бабина. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2007. 665 с.
16. Armbrusterl T., Bonazzi P., Akasaka M., Bermanec V., Chopin C., Gieré R., Heuss-Assbichler S., Liebscher A., Menchetti S., Pan. Y., Pasero M. Recommended nomenclature of epidote-group minerals // *European Journal of Mineralogy*. 2006. Vol. 18. No. 5. P. 551-567. DOI: 10.1127/0935-1221/2006/0018-0551.