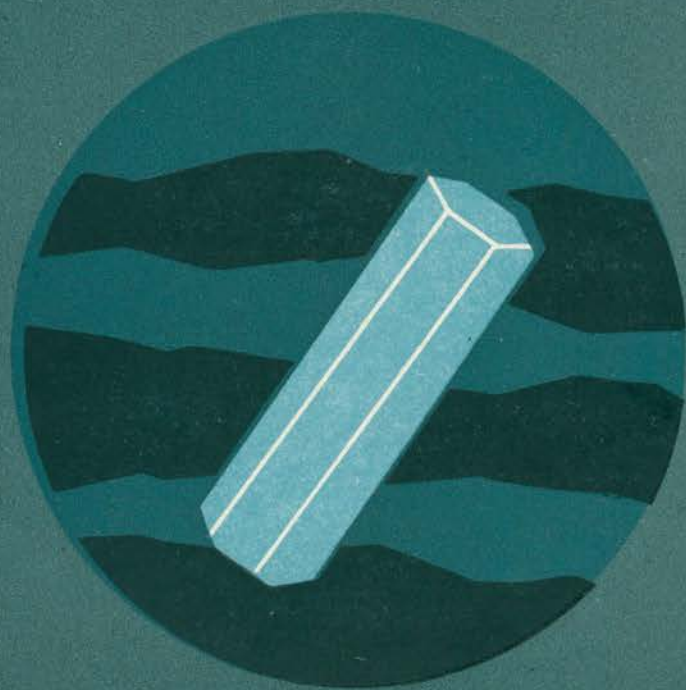


АКАДЕМИЯ НАУК СССР

В. Г. ФЕКЛИЧЕВ



БЕРИЛЛ

АКАДЕМИЯ
НАУК СССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ СССР

ИНСТИТУТ МИНЕРАЛОГИИ, ГЕОХИМИИ И КРИСТАЛЛОХИМИИ
РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ



В. Г. Фекличев

БЕРИЛЛ

МОРФОЛОГИЯ, СОСТАВ И СТРУКТУРА
КРИСТАЛЛОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1964

У.Д.К. 549.646

Ответственный редактор
доктор геол.-минер. наук *А. А. Бегс*

Введение

Важное значение для познания закономерностей эндогенного минералообразования и процессов образования кристаллов и их структуры имеют затронутые в книге основные вопросы строения кристаллов берилла. Главное внимание обращено на проблему зависимости генезиса, состава, строения и свойств кристаллов берилла. Эти вопросы разбираются на примере одного кристаллического вещества. Однако при обсуждении фактического материала используются общие закономерности, полученные для других кристаллов, а единичность исследуемого основного объекта позволяет провести исследование всесторонне и систематически.

Благодаря многообразию своих свойств и происхождения берилл является благодарным объектом исследования.

Основным материалом служили образцы берилла из Минералогического музея АН СССР. Кроме того, был изучен материал, собранный автором на некоторых месторождениях Советского Союза. Рассмотрены также бериллы из Минералогического музея ИМГРЭ АН СССР и ГКК СССР и из коллекции А. А. Беуса. Отдельные образцы для исследования предоставлены В. Г. Хрюкиным, Б. П. Соболевым, В. А. Корнетовой, О. В. Кононовым, Н. Е. Залашковой, А. А. Ситниным, Т. А. Соседко и др.

В работе по возможности разграничены результаты предыдущих исследований, дающиеся в виде обзоров, и новые данные.

Микрокристалломорфологические исследования кристаллов берилла проводились на универсальном исследовательском микроскопе Райхерт в ИМГРЭ АН СССР и ГКК СССР и Минералогическом музее АН СССР. Измерение спектров поглощения, интерференционная и фазовоконтрастная микроскопия, измерение светопреломления бериллов и другие виды оптических исследований и микрофотографирование выполнялись непосредственно автором на соответствующих установках в ИМГРЭ.

Химические анализы выполнены в аналитических лабораториях ИМГРЭ, полные химические анализы сделаны И. С. Разиной и З. Т. Катаевой. Рентгенограммы получены в рентгеноструктурной лаборатории ИМГРЭ.

Постоянную помощь в подготовке работы оказывал А. А. Беус, взявший на себя труд по ее редактированию. Работа была просмотрена также А. С. Марфуниным и Б. П. Соболевым. В. К. Подпорин принимал участие в оформлении и иллюстрации рукописи, Г. Г. Прохорова измеряла удельные веса.

Всем названным и другим товарищам и коллективам, помогавшим в работе, автор приносит свою благодарность.

Глава I

Общие сведения о берилле

Минералогия берилла

Минерал берилл известен с древнейших времен. Разновидность берилла — изумруд (смаганд) еще несколько тысячелетий назад ценилась как драгоценный камень. Наиболее древние месторождения изумрудов разрабатывались в древнем Египте до новой эры. Первое научное описание изумруда мы находим у Плиния в 77 в. н. э., который писал, что изумруды «знатнейшие суть скифские, названные по тому народу, у коего находятся». Давно был известен и аквамарин. Название берилл появилось позже.

Различаются следующие названия разновидностей: берилл, аквамарин, изумруд, воробьевит, ростерит, морганит, гешенит, гелиодор, давитсонит, бацит, игмеральд.

Теоретический химический состав берилла (в %): BeO — 14,14; Al_2O_3 — 19,02; SiO_2 — 66,84. Теоретическая формула берилла $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$. Главнейшие примеси в химическом составе берилла — щелочные элементы (Li, Na, K, Rb, Cs), вода, кальций, магний, железо (окисное и закисное), скандий, хром.

Сингония берилла гексагональная, дигексагонально-дипирамидальный вид симметрии. Пространственная группа $D_{6h}^2 - P_6/mcc$. Параметры элементарной ячейки обычного берилла: $a_0 = 9,23$; $c_0 = 9,19$; $c_0/a_0 = 0,996$. $Z = 2$. $c/a = 0,4989$ (Braqq and West, 1926).

Берилл имеет кольцевую структуру. Колонки из колец Si_6O_{18} располагаются между колонками из полиэдров с атомами Be и Al. Главнейшие простые формы кристаллов берилла: гексагональная призма $\{10\bar{1}0\}$, пинакоид $\{0001\}$, дипирамиды $\{11\bar{2}1\}$, $\{10\bar{1}1\}$ и призма $\{11\bar{2}0\}$.

Кристаллы берилла часто хорошо образованы и имеют столбчатый или призматический габитус. Грани многих кристаллов берилла покрыты характерными скульптурами роста и растворения.

Берилл в природе наблюдается в виде одиночных кристаллов, а также их разнообразных сростков. Спайность у берилла несовершенная по пинакоиду $\{0001\}$ и еще реже по призме $\{10\bar{1}0\}$. Излом неровный, раковистый. Хрупкий. Блеск стеклянный. Удельный вес колеблется в пределах 2,6—2,9. Тв. 6,6—8 по шкале Мооса. Берилл иногда люминесцирует в ультрафиолетовых и катодных лучах.

Берилл — минерал оптически одноосный, отрицательный. Показатели преломления меняются в следующих пределах: N_o 1,563—1,626; N_e 1,557—1,608; $N_o - N_e$ 0,003—0,018. У берилла встречается двуосность и другие оптические аномалии.

Берилл может быть бесцветным или окрашенным в зеленый, голубой, желтый, розовый, белый и другие цвета. В кристаллах берилла очень часто наблюдаются газово-жидкие и твердые включения.

Типы главнейших месторождений берилла
(в основу положена классификация месторождений бериллия, по А. А. Беусу, 1960)

Тип	Вмещающие породы	Парагенезис		Месторождение
		главные минералы	соответствующие редкометалльные минералы	
Миролоносные шпиро- видные пегматиты	Граниты, гнейсо-граниты	Микроклин, кварц, альбит	Фенакит	Бразилия, штат Минас-Жераес
	Блоковые и полнокристаллические мусковит-микророллиновые пегматиты	Микроклин, кварц, мусковит, альбит, шерл, фосфаты	Фенакит, берtrandит, хри- зоберилл, гердерит, берил- лонит, трифелин, колумбит- танталит, циртолит	Бразилия, штаты Риу-Гран- ди ду Норти, Параиба; Индия, Раджастан
Замещенные пегматиты	То же	Альбит, кварц, мусковит, спессартин, турмалин	Берtrandит, гердерит, бе- риллонит, литиофиллит, ко- лумбит, танталит	США, штат Коннектикут; Австралия, Воджина
	Слодунен-альбитовые и лепидолит-альбитовые	Альбит, кварц, мусковит, полихромные турмалины, спессартин	Гердерит, бериллонит, фе- накит, сподумен, лепидолит, петалит, литиофиллит, пол- луцит, колумбит-танталит, микролит	США, штат Нью-Мексико; Юго-Западная Африка
Пегматиты линии скреще- ния	Ультраосновные породы	Плагиоклазы (№ 18—40), флогопит, биотит, кварц, флюорит	Изумруд, фенакит, хризо- берилл, савенит, бериллий- маргарит	Африка, Трансвааль (Со- мерсет-Майн)

I. Месторождения в гранитных пегматитах

Таблица 1 (окончание)

Тип	Вмещающие породы	Парагенезис		Месторождения
		главные минералы	сопутствующие редкометалльные минералы	
II. Гидротермальные и гидротермально-пневматолитовые месторождения				
Бериллоносные грейзени-зирванские и альбитизированные граниты	Граниты, гранит-порфиры	Кварц, альбит, мусковит, микроклин, флюорит, топаз, турмалин	Берtrandит, фенакит, вольфрамит	США, штаты Аризона (Хилсайд), Юта, (Шип-Рок)
Грейзены	Граниты, гранит-порфиры	Кварц, альбит, мусковит, топаз, флюорит	Берtrandит, фенакит, бавеннит, гельвин, касситерит, вольфрамит	США, штаты Аризона, Вайоминг; Аргентина, провинция Сан-Луис
В гранитах	Гранодиориты	Альбит, мусковит, кварц, флюорит, микроклин	Циннвальдит, фенакит, берtrandит	СССР, Сибирь
В гранодиоритах	Граниты и вмещающие их метаморфические алюмосиликатные породы	Кварц, полевой шпат, мусковит, флюорит	Берtrandит, фенакит, гельвин, вольфрамит, касситерит, молибденит	США, штаты Южная Дакота, Вайоминг, Нью-Мексико, Аргентина, провинция Сан-Луис и Кордоба
Высокотемпературные кварцевые жилы с другими породообразующими минералами	Измененные ультраосновные породы	Плагиоклаз, кварц, флогопит, биотит, флюорит, хлорит, актинолит	Хризоберилл, фенакит, бавеннит, вольфрамит	Египет, Джебель Забара; Австралия, Пууна
Высокотемпературные слюдино-кварц-полевошпатовые и слюдитовые жилы в ультраосновных породах	Битуминозные известняки	Кальцит	Гельвин, паризит	Колумбия (Музо); Бразилия (Бом Иезус дос Мейрас)

В воде берилл нерастворим. Устойчив в кислотах, кроме HF. Температура плавления берилла 1420°. Дифференциальные кривые нагревания бериллов до 1000° не показывают никаких резких температурных эффектов.

В природе берилл выделяется путем свободной кристаллизации или образуется метасоматически. При гидротермальном изменении берилл может замещаться альбитом, кварцем, берtrandитом, бавенитом, фенакитом, мусковитом и другими минералами. Берилл устойчив к процессам выветривания.

Месторождения и парагенезис берилла

Берилл является наиболее широко распространенным бериллиевым минералом. Он встречается в различных постмагматических образованиях: пегматитах, грейзенах и гидротермальных месторождениях. А. А. Беусом и А. А. Ситниным (1959) в СССР выявлен новый тип бериллиевой минерализации — бериллоносные граниты, в которых берилл как акцессорный минерал присутствует в гранитах, измененных постмагматическими процессами альбитизации и грейзенизации.

Месторождения берилла изучались многими исследователями. Крупнейшие работы проведены отечественными учеными, в первую очередь А. Е. Ферсманом (1922, 1925, 1940), К. А. Власовым (1936, 1938), А. А. Беусом (1956, 1959, 1960, 1962), Д. И. Щербаковым (1936), Н. А. Солодовым (1962). В двух последних монографиях А. А. Беуса (1960; Беус и др., 1962) обобщен огромный фактический материал по парагенезисам и месторождениям берилла всех известных типов.

Главнейшие типы промышленных месторождений берилла вместе с указанием характерных минеральных ассоциаций и парагенезисов даны в табл. 1. Берилл как второстепенный минерал встречается также в большинстве месторождений других бериллиевых минералов. Стоящая особняком разновидность берилла — бацит — известна в Альпах, среди альпийских жил в Аарском гранитном массиве.

Классификация берилла и его разновидности

Изменчивость свойств берилла и широкий диапазон его месторождений и парагенезисов определили большую дробность подразделения берилла на разновидности и многообразие его классификаций. Только кварц можно сравнить с бериллом по многочисленности названий разновидностей.

На ранних этапах минералогического изучения берилла разновидности выделялись в основном по цвету, прозрачности и реже по морфологическому признаку. Выделялись: собственно берилл — обычная желтовато-зеленых тонов разновидность, чаще всего непрозрачная; изумруд (смарagd, игмеральд) — ярко-зеленая разновидность; аквамарин — прозрачная разновидность цвета морской воды; гелиодор — прозрачная разновидность желтовато-бурого и золотистого цвета; ростерит — разновидность пластинчатого габитуса белого или светло-розового цвета.

На основании особенностей химического состава берилла были дополнительно выделены: богатая марганцем и цезием красно-бурая разновидность — морганит; богатая натрием разновидность яблочно-зеленого цвета — гешенит; богатая цезием разновидность светло-розового или желтого цвета (но может быть и других цветов) — воробьевит; богатая скандием, железом и редкими землями разновидность — бацит.

Необходимо отметить также две недавно выделенные характерные разновидности берилла, отличающиеся особенностями химического состава. Широко распространенный натриевый берилл был детально охарактеризован А. А. Беусом и Н. Е. Залашковой (1956). Необычный

Классификация естественных типов берилла

I. Бериллы из гранитных пегматитов

Тип месторождения	Незамещенные пегматиты в гранитах, в том числе в шпировидных гранитных пегматитах	Альбитизированные участки в гранитных пегматитах	Альбитизированные и лепидолитизированные гранитные пегматиты
Химические особенности берилла	Бесщелочные и слабощелочные (калиевые), иногда железистые аквамарины, гелиодоры	Щелочные (натровые)	Сильнощелочные с редкими щелочами (ростериты, вобьевиты, морганиты)
Габитус кристаллов	Призматический	Призматический, кокусовидный	Короткопризматический, пластинчатый
Цвет	Голубой, зеленый, желтый	Белый, светло-зеленый	Белый, розовый
Удельный вес	Низкий*	Средний	Высокий
Светопреломление	Низкое, редко среднее	Среднее	Высокое

II. Бериллы из гидротермально-пневматолитовых месторождений в гранитах и других алюмосиликатных породах

Тип месторождения	Бесщелочные грейзены зон кислотного выщелачивания и высокотемпературные гидротермальные месторождения	Альбитизированные граниты и грейзены, связанные с отложением альбита	Альпийские жилы в гранитах
Химические особенности берилла	Бесщелочные, сильножелезистые (аквамарин, гелиодоры)	Щелочные (натровые и кальциево-натровые)	Скандиевый (бацит)
Габитус кристаллов	Длиннопризматический, игольчатый	Призматический, скелетный	Бочонковидный
Цвет	Яркий голубой, желтый, зеленый	Белый, светло-голубой, светло-желтый, светло-зеленый	Синий
Удельный вес	Низкий, средний	Средний	Высокий
Светопреломление	Низкое, среднее	Среднее	Высокое

III. Бериллы из месторождений в метасоматически измененных основных, ультраосновных и карбонатных породах

Тип месторождения	Жильные пегматитовые и гидротермальные образования в измененных основных и ультраосновных породах, также метасоматические породы ультраосновного и основного состава	Гидротермально измененные карбонатные породы
Химические особенности берилла	Бесщелочные и слабощелочные, обогащенные Mg, Fe, Ca, Cr (изумруды)	Бесщелочные, обогащенные Mg, Ca, Cr (изумруды)
Габитус кристаллов	Призматический, сростки	Призматический
Цвет	Ярко-зеленый, зеленый, бесцветный	Ярко-зеленый
Удельный вес	Средний	Средний
Светопреломление	Среднее	Среднее

* Имеется в виду низкий, средний и высокий удельный вес и светопреломление в диапазоне значений, характерных для берилла.

Состав и свойства	Бериллы из гранитных пегматитов						
	1. В шпидродном гранитном пегматите	2. Запоровый пегматита	3. Незамещенный пегматит	4. Альбитизированные пегматиты	5. Альбитизированные пегматиты	6. Центральная зона гранитного пегматита	7. Перекристаллизованный берилл из альбитизированных пегматитов
SiO ₂	64,86	65,60	65,40	65,23	60,85	61,88	64,47
TiO ₂	Не обн.	Не опр.	Не опр.	Следы	Не обн.	0,01	Не опр.
Al ₂ O ₃	19,35	16,96	18,38	18,69	19,95	17,10	18,09
Fe ₂ O ₃	0,62	0,74	0,99	0,68	0,29	0,08	1,38
FeO	Не обн.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не обн.	Не обн.	Не опр.
MnO	Не обн.	Не опр.	Следы	Следы	Следы	Не обн.	Следы
MgO	0,30	0,40	0,44	0,25	0,49	0,22	0,68
CaO	0,20	1,52	0,43	0,53	0,36	0,44	0,86
SrO	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не обн.	Не опр.	Не опр.
BaO	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Na ₂ O	0,14	0,42	0,27	0,22	1,62	2,50	0,39
K ₂ O	0,25	0,76	0,18	0,46	0,53	Не обн.	0,27
Li ₂ O	0,024	Не опр.	0,009	0,053	0,97	0,60	0,012
CS ₂ O	Не опр.	Не опр.	0,023	Не опр.	0,18	4,13	0,016
Rb ₂ O	Не опр.	Не опр.	0,011	Не опр.	0,03	Не обн.	0,028
BeO	13,29	12,74	12,68	12,13	10,19	10,54	12,39
H ₂ O ⁺	0,32	0,81	0,15	0,90	0,76	2,26	0,27
H ₂ O ⁻	Не обн.	0,22	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0,46	Не обн.
П. п. п.	0,28	Не опр.	1,24	1,01	Не опр.	Не опр.	1,40
Сумма	99,53	100,17	99,90	100,15	99,82*	99,92	100,25
Аналитик	З. Т. Катаева	И. С. Разина	И. С. Разина	З. Т. Катаева	И. С. Разина	Е. Н. Егорова-Фурсенко	И. С. Разина
Уд. вес	2,67	2,71	2,66	2,71	2,72	2,78	
Светопреломление							
<i>N_o</i>	1,572	1,582	1,578	1,576	1,586	1,592	1,593
<i>N_e</i>	1,568	1,575	1,574	1,573	1,580	1,586	1,586
<i>N_o-N_e</i>	0,004	0,006	0,004	0,003	0,006	0,006	0,007
Цвет	Салатный	Желто-го-зеленый	Голубовато-зеленый	Светло-зеленый	Светло-розовый		Бесцветный
Габитус	Призматические, столбчатые кристаллы	Призматические столбчатые кристаллы	Призматические кристаллы	Призматические	Короткопризматические кристаллы	Огранки не имеет	Скелетные кристаллы

* 3,60% P₂O₅. ** Наши определения. *** 0,25 Cr₂O₃.

1 — слабощелочной натро-калиевый берилл, Европейская часть СССР (1—5 данные автора); 2 — слабощелочной кальциевый берилл, КНР; 3 — слабощелочной берилл, Европейская часть СССР; 4 — щелочной натро-калиевый, Сибирь; 5 — сильнощелочной натро-литиевый берилл с фосфором; 6 — сильнощелочной натро-цезиевый берилл, Европейская часть СССР (Соседко, 1957); 7 — щелочной берилл Сибирь (данные

Таблица 3

Типов берилла

Берилл из гидротермально-пневматолитовых месторождений в гранитных и других алюмосиликатных породах					Берилл из месторождений в метасоматически измененных основных и ультраосновных и карбонатных породах		
8. Кварцево-топазовые грейзены	9. Пневматолиты с моллибденом	10. Грейзены	11. Альбитизированные граниты	12. Грейзенизированные гранодиориты	13. Жильные образцы в метасоматически измененных эфемериках	14. Кварцево-полевчатые зоны в обогатительных сланцах	15. Гидротерм. жилы в карбонатных породах
65,73	65,70	65,15	64,93	64,95	64,69	65,50	65,26
Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не обн.	Не опр.	Не обн.	Не обн.	Не опр.
17,23	16,70	17,13	17,94	16,95	15,16	17,92	17,60
1,47	0,43	0,43	0,50	1,27	0,35	0,90	0,09
Не обн.	1,07	0,98	Не обн.	Не обн.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Не обн.	Следы	Следы	0,01	Следы	Следы	Не опр.	0,06
Не обн.	0,32	0,36	0,39	Следы	1,89	0,38	0,77
Не обн.	1,51	1,61	0,44	1,20	0,80	0,75	0,69
Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	0,015
Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	0,16
Не обн.	0,03	0,45	1,26	1,50	1,80	0,86	0,50
Не обн.	0,31	0,51	0,85	0,75	Следы	0,26	0,22
Не обн.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	0,007	Не опр.	Не обн.	0,105
Не обн.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	0,024	Не опр.	Не опр.	Не обн.
Не обн.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не обн.
13,39	14,15	13,44	11,99	11,93	13,37	12,03	13,20
1,05	0,13	0,27	0,59	Не опр.	1,29	0,64	
Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0,15	Не обн.	Не обн.	1,84
Не обн.	Не опр.	Не опр.	1,41	1,53	Не опр.	0,71	Не опр.
99,87	100,39	100,30	100,31	100,35	99,60 ***	99,95	100,58
М. Е. Славский	И. С. Разина	И. С. Разина	И. С. Разина	З. Т. Катаева	М. Е. Казакова	З. Т. Катаева	Замбонини и Каглиоти
2,67**		2,69	2,7	2,69	Не опр.	2,642	2,725
1,573	1,571	1,576	1,587	1,577	1,586	1,572	1,580
1,568	1,568	1,572	1,581	1,574	1,582	1,569	1,574
0,005	0,003	0,004	0,006	0,003	0,004	0,003	0,006
Голубой	Зеленый	Желтый	Светлоголубой	Светлозеленый	Зеленый		Яркозеленый
Длиннопризматические, игольчатые кристаллы	Призматические кристаллы	Призматические кристаллы	Скелетный призматический кристалл	Призматические кристаллы	Призматический зональный кристалл	Призматические столбчатые кристаллы	Призматические столбчатые кристаллы

автора); 8—бесщелочной аквамарин, Сибирь (Суцинский, 1928); 9—слабощелочной кальциевый берилл, Казахстан (9—12—данные автора); 10—щелочной гелиодор, Сибирь; 11—щелочной натриевый берилл, КНР; 12—щелочной натриевый берилл, Сибирь; 13—изумруд, обогащенный магнием, СССР (Власов, Кутукова, 1960); 14—изумруд, Казахстан (данные автора); 15—изумруд, Мюзо, Колумбия (Хинце, 1897; Замбонини и Каглиоти, 1928; Вальтер, 1950).

берилл, содержащий большое количество Cs_2O и других щелочей и также Fe_2O_3 , FeO , MgO и пониженное количество Al_2O_3 , был описан Шаллером, Стевенсом и Янсом (Schaller, Stevens and Jahns, 1962).

Синтетический изумруд получил название «игмеральд» (igmerald; Espig, 1935). Большинство выделенных разновидностей характеризуются определенными особенностями физических и химических свойств и отличаются по генезису.

Поскольку химический состав берилла в наибольшей степени отличает разновидности берилла друг от друга и определяет многие другие свойства берилла, группа берилла в целом классифицировалась по химическому составу. При этом учитывались главнейшие примеси в берилле — щелочи (их сумма и соотношение). Собственно щелочные бериллы подразделялись А. И. Гинзбургом (1955) на три группы: натриевые ($\text{Na} + \text{K} = 75\text{—}100\%$ суммы щелочей); литиево-натровые ($\text{Na} + \text{K} = 50\text{—}75\%$ суммы щелочей); литиевые ($\text{Na} + \text{K} < 50\%$ суммы щелочей).

А. А. Беусом (1960) все бериллы по химическому составу подразделялись следующим образом:

	Бесщелочной	Натриевый	Натро-литиевый	Цезиевый
R_2O	<0,5%	>0,5%	>1%	>1%

Необходимо отметить, что классификации берилла по химическому составу с учетом только щелочей страдают некоторой односторонностью, поскольку не учитываются другие важные примеси: Fe, Mg, Ca, Cr, Sc. Более того, подразделение берилла, основанное даже на учете всех его химических особенностей, все же не будет исчерпывающим и точным, если не учитывать генетических особенностей берилла и некоторых его физических свойств. Ведь в разных типах месторождений встречаются бериллы одинакового состава и с одинаковыми физическими свойствами и, наоборот, в одном месторождении встречаются бериллы разного состава и с разными физическими свойствами. Это требует подразделения берилла по всей совокупности его свойств.

Естественные типы берилла

С ростом наших знаний об условиях и способе выделения берилла в природе возникает все большая необходимость класть в основу классификации и подразделения берилла на естественные типы характер происхождения и всю совокупность свойств минерала, разделяющую его на разновидности (в том числе так называемые типоморфные признаки).

В последнее время благодаря работам А. А. Беуса и др. (Беус, 1961; Беус и Ситнин, 1959, 1961; Гинзбург, 1959; Заболотная и Новикова, 1959; Беус и др., 1962) получены принципиально новые данные о месторождениях берилла в альбитизированных гранитах, метасоматически измененных ультраосновных породах, грейзеновых месторождениях, в гранодиоритах и т. д. Нами проведено изучение физических и химических свойств берилла из различных типов месторождений, в том числе из новых типов месторождений берилла (альбитизированных гранитов и грейзенизированных гранодиоритов), проведен детальный осмотр и микроскопическое изучение богатых фондов Минералогического музея АН СССР, проработана многочисленная литература по бериллу. Все это позволило разработать классификацию естественных типов берилла, характеризующихся индивидуализированной совокупностью свойств и отличающихся по характеру происхождения (табл. 2). В табл. 3 представлены примеры различных естественных типов берилла, в основном по нашим данным.

Кристаллохимическое строение берилла

Структура берилла

и ее изменение в зависимости от химического состава

К моменту расшифровки структуры берилла его теоретическая химическая формула была установлена, в частности, был известен кремнекислородный радикал Si_6O_{18} , предполагающий кольцевую структуру. В 1926 г. структура берилла была расшифрована Брэггом и Вестом (Bragg and West, 1926). На изученном ими кристалле берилла были определены по наблюдаемым отражениям следующие параметры элементарной ячейки: $c=9,17 \text{ \AA}$; $a=9,21 \text{ \AA}$; $c/a=0,9956/1$. Элементарная ячейка содержала две молекулы $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$. Пространственная группа D_{6h}^2 или C_{6h}^6 была найдена путем установления отсутствующих отражений. На основе найденной симметрии было проведено возможное расселение атомов в пределах элементарной ячейки и сопоставлено с данными рентгеновского анализа. Таким образом, была окончательно установлена структура и выбраны семь необходимых параметров, которые ее определяют.

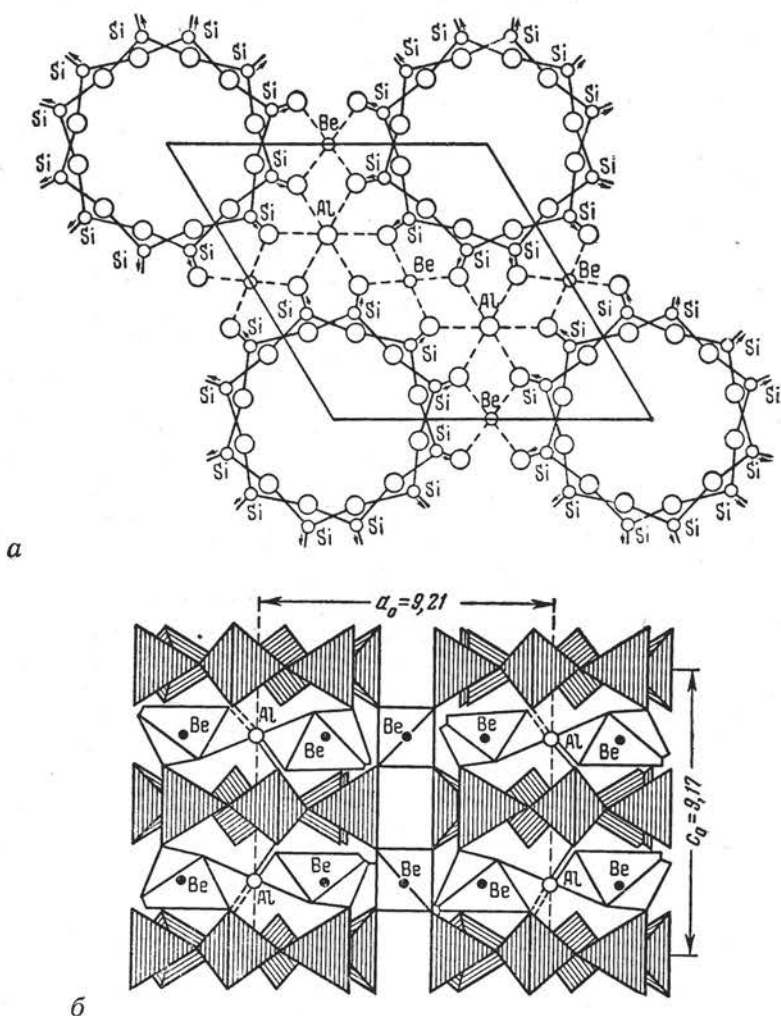
У берилла действительно оказалась кольцевая структура. Кольца Si_6O_{18} располагаются слоями параллельно $\{0001\}$. Кольца также вытянуты вдоль оси симметрии L_6 , образуя каналы. Между кольцами, но не в их плоскости и не на одной с ними вертикальной линии располагаются ионы бериллия в четверной координации и ионы алюминия в шестерной координации. Полная структура берилла, по Брэггу (1930), изображена на фиг. 1.

Уже Брэгг (1930) обратил внимание на каналы в структуре берилла. Эти каналы сыграли важную роль в последующем кристаллохимическом изучении берилла. Брэгг писал: «Гексагональные оси, которые проходят через центры колец, лежат в пустых каналах кристалла, которые имеют довольно значительную ширину. Если мы примем для атома кислорода диаметр равным $2,7 \text{ \AA}$, то в таком канале окажется как раз достаточно места для того, чтобы через него мог пройти этот атом. Быть может, эти каналы являются объяснением обычных включений в берилле гелия, а иногда даже очень крупных ионов, как Cs».

Шибольд (1937) обратил внимание на то, что «структуру берилла удобно также рассматривать как пространственную вязь, составленную совместно тетраэдрами $[\text{SiO}_4]$ и тетраэдрами же $[\text{BeO}_4]$ ». Это позволило позднее А. Н. Винчеллу и Г. Винчеллу (1953) высказаться еще более определенно: «Берилл — явный каркасный силикат; он рассматривается как кольцевой только потому, что тетраэдры $[\text{BeO}_4]$ считаются не эквивалентными тетраэдрам $[\text{SiO}_4]$, и в этом случае четко выступают гексагональные кольца Si_6O_{18} ».

В 1951 г. Н. В. Беловым и Р. Г. Матвеевой было проведено уточнение структуры берилла. Определение параметров структуры берилла было проведено с помощью частичной проекции (половины ячейки,

выделяя одно кольцо). Координаты между атомами были определены с большой точностью. Интересно, что два кремнекислородных кольца оказались повернутыми в элементарной ячейке на 25° вокруг шестерной оси.



Фиг. 1. Структура берилла, по Брэггу.

а — проекция на плоскость (0001); б — проекция на плоскость (1010)

Сопоставление структур берилла со структурами других шестикольцевых силикатов с общим структурным планом проведено в работе Н. В. Белова и Т. Н. Тарховой (1951), посвященной расшифровке структуры турмалина.

Измерение параметров элементарной ячейки берилла проводилось неоднократно (табл. 4). К сожалению, не все эти измерения сопровождались полными химическими анализами.

Виллалба (Villalba, 1953) для изумруда из Колумбии получил следующие, отличающиеся от обычных, параметры: $a - 9,5077$, $c - 4,681$, $Z=3$; пространственную группу C_6/mmm .

На трех образцах щелочных бериллов было убедительно показано, что с увеличением в составе берилла количества щелочей параметр c_0 увеличивается, а параметр a_0 остается без изменения (Соседко, 1957:

Параметры элементарной ячейки бериллов

№ п/п	Минерал	Особенности химического состава	a_0	c_0	c_0/a_0	Источник
1	Берилл	—	9,23	9,19	0,996	Брегг и Вест (Bragg and West, 1926)
2	»	—	9,21	9,17	0,996	То же
3	Изумруд	Синтетический	9,185	9,216	1,003	Шибольд (Schiebold, 1935)
4	»	Примесь Cr_2O_3	9,207	9,170	0,996	То же
5	»	»	9,396	9,212	0,980	»
6	»	»	9,196	9,212	1,002	»
7	Берилл		9,188	9,189	1,000	Нориш (Norrisch, 1950)
8	Изумруд	Примесь Cr_2O_3	9,51	9,36	0,984	Виллалба (Villalba, 1953)
9	Берилл		9,22	9,18	0,997	Бергерхофф, Новацкий (Bergerhoff and Nowacki, 1955)
10	Бацитит	$\approx 3\% \text{ Sc}_2\text{O}_3$	9,51	9,10	0,959	Пейронель (Peugnonell, 1954)
11	»	$\approx 10\% \text{ Sc}_2\text{O}_3$	9,50	9,18	0,966	Бергерхофф, Новацкий (Bergerhoff and Nowacki, 1955)
12	Берилл	$\Sigma \text{R}_2\text{O} - 1,84\%$	9,202	9,183	0,998	Франк-Каменецкий и Соседко, 1958
13	»	$\Sigma \text{R}_2\text{O} - 3,39\%$	9,202	9,209	1,0001	То же
14	»	$\Sigma \text{R}_2\text{O} - 7,23\%$	9,200	9,227	1,030	»
15	»	$\text{Cs}_2\text{O} - 6,62, \text{Na}_2\text{O} - 1,16, \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2,08, \text{FeO} - 2,24, \text{MgO} - 2,16\%$	9,30	9,20	0,989	Шаллер и др. (Schaller, Stevens and Jahns, 1962)
16	»	Синтетический	9,21	9,20	0,999	То же

Франк-Каменецкий и Соседко, 1958). Результаты измерений включены в табл. 4 (№ 12—14).

Выясняя причину зависимости изменения параметра c_0 с изменением содержания щелочей, В. А. Франк-Каменецкий и Т. А. Соседко (1958) построили зависимость между средними ионными радиусами щелочных металлов (R_1) + бериллия (R_2) и параметром c_0 и средним ионным радиусом системы $R_1 + R_2 + R_3$ (R_3 — средний ионный радиус Al и замещающих его атомов) и параметром c_0 . Результаты расчетов приведены в табл. 5. Соответствующие зависимости получились почти прямые (фиг. 2). На их основании делается вывод, что «увеличение параметра c_0 решетки щелочных бериллов связано с увеличением среднего ионного радиуса Al—Be слоя в структуре берилла».

Не со всеми результатами проведенных исследований можно согласиться. Относительно утверждений, что берилл является каркасным силикатом, можно сказать следующее. Хотя бериллий, так же как и кремний, имеет четверную координацию, но роль его в структуре берилла резко отличается. Если кремнекислородные тетраэдры образуют сквозные каналы, трубы, заполненные водой, инертными газами, щелочами, то ионы бериллия и алюминия представляют собой как бы растяжки и распорки между этими трубами. Кремнекислородные тетраэдры

Расчет средних ионных радиусов Be—Al слоя в берилле по Франк-Каменецкому и Соседко (1, 2, 3), в берилле из Аризоны (4)

№ п/п	Число атомов катионов на 18 кисл. ед.				Суммарное число атомов катионов слоев $2R_1^+$	Средний ионный радиус $r_{R_1, A}$	Число атомов ка-тионов R_2 (Be) на 18 кисл. ед.	Суммарное число ато-мов катионов щело-чей и Be	Средний ионный радиус систем R_1+R_2, A	Число атомов катионов на 18 кисл. ед.				Суммарное число ка-тионов R_3	Средний ионный радиус системы $(R_1+R_2+R_3), A$	Количество Si
	Li	Na	Cs	Ca						Al	Fe	Mg	Ti			
1	0,12	0,22	0,01	0,03	0,38	0,92	2,78	2,97	0,41	1,93	0,01	0,03	0,01	1,98	0,47	6,03
2	0,46	0,24	0,02	0,04	0,76	0,83	2,66	3,04	0,45	1,92	0,01	0,03	0,01	1,97	0,49	6,01
3	0,24	0,47	0,19	0,04	0,94	1,03	2,47	2,96	0,52	1,96	0,01	0,03	0,01	2,01	0,54	6,02
4	0,09	0,23	0,29	0,01	0,64*	1,27	3,02	3,66	0,50	1,26	0,35	0,32	—	1,97**	0,55	5,99

* Добавлен K — 0,02. ** Добавлено Cr — 0,01; Sc — 0,01; Mn — 0,02.

в структуре берилла очень устойчивы, в то время как тетраэдры BeO_4 непрочны. Бериллий, так же как и алюминий, участвует в сложных изоморфных замещениях, содержание его в берилле в отличие от постоянного содержания кремния колеблется. По химическим свойствам в структуре берилла бериллий гораздо ближе к выполняющему роль основного катиона алюминию, чем к кремнию, выполняющему роль кислотного катиона. Химические анализы берилла свидетельствуют об отсутствии изоморфных замещений между Be и Si, что также говорит об неравноценности тетраэдров BeO_4 и SiO_4 в структуре берилла.

Берилл — кольцевой силикат бериллия и алюминия с упорядоченной структурой.

Большое число определений параметров элементарной ячейки бериллов позволяет получить новые данные о зависимости этих параметров от химического состава берилла.

Сопоставление химических особенностей и параметров элементарной ячейки необычного берилла из Аризоны (табл. 4, № 15); полный химический анализ этого берилла (см. табл. 8) обнаруживают несоответствие с зависимостями, полученными В. А. Франк-Каменецким и Т. А. Соседко. Во-первых, параметр a_0 больше параметра c_0 несмотря на высокое содержание щелочей. Во-вторых, если мы вычислим для аризонского берилла средние ионные радиусы R_1+R_2 и $R_1+R_2+R_3$ и нанесем на графики на фиг. 2, то точки R_1+R_2 и $R_1+R_2+R_3$ резко выпадут из прямых зависимостей. Действительно, значение $R_1+R_2+R_3=0,55$ должно отвечать параметру $c_0=9,24$, а он равен 9,20. Если все аналитические определения верны, то получившееся противоречие можно

объяснить только неверностью применения среднего ионного радиуса для объяснения изменения параметров элементарной ячейки берилла. Если объяснять изменение параметров структуры берилла увеличением среднего ионного радиуса в Al—Be слое, причем в этот слой без всякого доказательства помещаются и щелочные атомы, то с увеличением среднего ионного радиуса Al—Be слоя должны увеличиваться оба параметра и даже параметр a_0 должен увеличиваться больше, так как ионы Be и Al расположены в тесном пространстве между трубами из кремнекислородных колец и должны их расширять, а атомы щелочей помещаются в А. Франк-Каменецким и Т. А. Соседко в фонари между двумя кольцами Si_6O_{18} , где даже самому большому щелочному иону Cs достаточно места без изменения параметров элементарной ячейки.

Однако как объяснить неоспоримую закономерность, полученную В. А. Франк-Каменецким и Т. А. Соседко (1958), которые показали, что с увеличением общего количества щелочей в щелочных бериллах, не содержащих других существенных примесей, параметр c_0 увеличивается? Этот вопрос тесно переплетается с проблемой положения щелочных и других атомов в структуре берилла. Поэтому только после рассмотрения этой проблемы мы вернемся к зависимости параметров элементарной ячейки берилла от химического состава.

Химический состав и кристаллохимия берилла

По химическому составу берилла в научной литературе собран громадный материал. Сейчас известно, что в состав берилла $Be_3Al_2Si_6O_{18}$ входят следующие примеси, которые иногда содержатся в количестве более 1%: Fe_2O_3 , FeO, MgO, CaO, Na_2O , K_2O , Li_2O , Cs_2O , Rb_2O , Cr_2O_3 , Sc_2O_3 , H_2O^+ . Кроме того, в незначительных количествах в берилле могут содержаться: Mn, Ti, V, Sr, Ba, Co, Ni, B, P, Ca, Ge, Bi, Nb, Ta, Cu, Zn, Pb, Sn, W, TR, Zr (табл. 6).

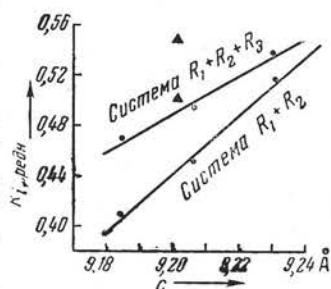
Уже давно были предприняты попытки обобщений по этому вопросу (Penfield, 1884, 1886; Hintze, 1897; Вернадский, 1908; Ненадкевич, 1911; Doelter, 1917).

Основное внимание исследователей привлек изоморфизм и характер вхождения в берилл главных примесей — щелочей.

Примеси щелочей. Большую роль, которую играют в составе берилла щелочные металлы и особенно Na, Li, Cs, раньше всех отметил Пенфильд (Penfield, 1884, 1886) по результатам анализов щелочных бериллов. Он считал, что щелочные металлы в берилле замещают бериллий.

В. И. Вернадский (1908) впервые предложил рассматривать щелочные бериллы как единый изоморфный ряд, крайними членами которого являются бесщелочной аквамарин и обогащенный цезием воробьевит. Промежуточными членами являются натровый берилл, обогащенный натрием, но без лития и цезия, и литиевый берилл, обогащенный литием, но без цезия.

А. И. Гинзбург (1955) впервые подчеркнул зависимость в содержании бериллия и щелочей в берилле, выражающуюся в закономерном уменьшении содержания бериллия с увеличением щелочей. На основании этого он сделал вывод о гетеровалентном изоморфизме между берил-



Фиг. 2. Зависимость между параметром c и средними ионными радиусами R_1+R_2 и $R_1+R_2+R_3$

▲ — для аризонского берилла.

Максимально наблюдавшиеся в берилле количества примесей

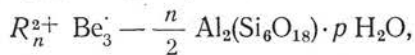
Оксид, элемент	Вес. %	Автор	Оксид, элемент	Вес. %	Источник
Fe ₂ O ₃	2,83	Гаврусевич (1946)	Rb ₂ O	1,42	Симпсон (Simpson, 1948)
FeO	2,24	Шаллер и др. (Schaller, Stevens and Jahns, 1962)	TiO ₂	0,8	Оппенгейм (1955)
NiO	0,10	Гаврусевич (1946)	Cr ₂ O ₃	2,00	Гогерс и Сперисен (Gogers and Sperisen, 1942)
MnO	0,74	Замбонини и Каглиоти (Zambonini e Caglioti, 1928)	V ₂ O ₃	0,90	Гольдшмидт (Goldschmidt, 1954)
MgO	3,37	Якоб (Jakob, 1938) Симпсон (Simpson, 1948)	SrO	0,06	Замбонини и Каглиоти (Zambonini e Caglioti, 1928)
CaO	3,98	Замбонини и Каглиоти (Zambonini e Caglioti, 1928)	BaO	0,58	Наши данные
Na ₂ O	4,22	То же	Sc ₂ O ₃	10,00	Бергерхофф и Новацкий (Bergerhoff and Nowacki, 1955)
K ₂ O	2,25	Лакруа (Lacroix, 1914)	Ba ₂ O ₃	0,39	А. Н. Винчелл и Г. Винчелл, 1953
Li ₂ O	2,00	Шаллер и др. (Schaller, Stevens and Jahns, 1962)	P ₂ O ₅	3,60	Наши данные
Cs ₂ O	6,68		H ₂ O	3,00	Симпсон (Simpson, 1948)
Sp*	1,00	Шредер (Schröder, 1941)	Nb ₂ O ₅ ***	1,75	Сущинский (1923)
ZrO ₃ **	0,80	Сущинский (1923)			

* Определено в элементарной форме.

** Данные сомнительны.

*** Весьма сомнительны данные Дольтера (Doelter, 1917) по старым анализам: 0,80% NiO, 0,28% Ta₂O₅, 2,77% Li₂O.

лием и двумя щелочными атомами. Такой характер изоморфизма он считал возможным, поскольку в структуре берилла присутствуют полые каналы. А. И. Гинзбургом выведена на основании этого формула, характеризующая состав щелочных бериллов:



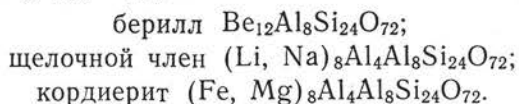
где $n = 0-1$, $p = 0,2-0,8$, R^{1+} — щелочной ион. Эта формула отражает главные особенности химизма берилла — отношение между щелочами и бериллием и учитывает постоянное присутствие воды в берилле. Щелочные бериллы А. И. Гинзбургом подразделяются на натриевые, литиево-натриевые, литиевые (или цезиево-литиевые).

Оригинальное исследование, не отраженное в нашей литературе, проведено Фолинсби (Folinsbee, 1941). Он, сопоставляя структурные и другие свойства кордиерита и берилла, разбирает проблему вхождения щелочей в эти минералы, подчеркивает близость в структурах, оптических свойствах, составе примесей у этих минералов. Количество H₂O⁺ и щелочей в берилле и кордиерите колеблется в следующих пределах:

	Кордиерит	Берилл
H ₂ O ⁺	0,50—3,75%	0,37—3,00%
R ₂ O	0,1 —4,4%	0,4 —7,8%
	(все анализы)	(20 анализов)

Показатели преломления кордиерита, так же как у берилла, увеличиваются с увеличением количества щелочей. Фолинсби считает, что в берилле возможно замещение в химическом составе по схеме:

$3 \text{ щелочных иона } \text{Na}^{+1} + |\text{Al}^{+3} = 3\text{Be}^{+2}$. Он предполагает возможность перехода между бериллом и кордиеритом путем замены ионов Be, Li, Na, Fe, Mg друг другом:



Однако химические составы щелочных бериллов не подтверждают идеи Фолинсби о щелочном члене, поскольку в щелочных бериллах количество алюминия выдерживается постоянным. То же самое можно сказать по поводу формулы воробьевита в виде $\text{CsBe}_3\text{Al}_2(\text{Si}_5\text{AlO}_{18})$, предложенной А. Г. Бетехтиным (1950), который считал, что «вхождение в состав берилла щелочей должно сопровождаться соответственным увеличением заряда в анионном радикале» за счет замещения на Al.

А. А. Ситничим и Л. И. Сажинной (1959) было проведено исследование распространения рубидия в бериллах, которое показало колебания в его содержании от 0,001% в бесщелочных разностях до 0,13% в одной литиево-цезиевой разности. Т. Ф. Боровик-Романова и Т. А. Соседко (1957) отмечали содержание в берилле Rb от 0,0033 до 0,110%. Эти данные говорят о том, что рубидий, так же как и другие щелочи, может встречаться в бериллах.

Позднее между Н. В. Беловым (1959_{1,2}) и А. А. Беусом (1959_{1,2}) разгорелась дискуссия по коренному вопросу проблемы — о самом механизме замещения Be на щелочные металлы и о положении последних в структуре берилла. Н. В. Белов, основываясь на кристаллохимическом сходстве ионов Be и Li и принимая во внимание присутствие Li в щелочных бериллах, считал, что изоморфизм замещения существует только между Be и Li, а остальные щелочные ионы, не превышающие, как он считал, в берилле количества Li, располагаются в полых каналах¹.

А. А. Беус, проводя аналогию между структурами берилла и миларита, считал, что изоморфизма замещения между Be и щелочными атомами в берилле не существует, а обратная зависимость в количественном содержании бериллия и щелочей носит более сложный характер, связанный с замещением алюминия в шестерной координации на атом щелочи с параллельным замещением бериллия на алюминий в четверной координации. Для компенсации валентности вторая половина щелочных атомов входит в полые каналы в структуре берилла.

А. А. Беусом в ходе дискуссии было показано, что во многих щелочных бериллах содержание окиси лития намного меньше других щелочей. Общим для обеих гипотез является то, что предполагается две разных позиции щелочных ионов в структуре берилла, одна из которых — в полых каналах.

По В. А. Франк-Каменецкому и Т. А. Соседко (1958), изоморфизм в бериллах связан с замещением с заменой положения, когда все щелочные металлы размещаются в Al — Be слое. В. А. Франк-Каменецкий и Т. А. Соседко в их совместной работе поместили щелочные атомы в одну позицию; между кремнекислородными кольцами в каналы. Но в более поздней работе В. А. Франк-Каменецкий (1959), становясь в дискуссии о щелочных бериллах на сторону Н. В. Белова, изменяет

¹ В ходе дискуссии Н. В. Белов вынужден был допустить существование в щелочных безлитиевых бериллах пустых тетраэдров без Be.

свою точку зрения, допуская возможность замещения Be на Li, а поэтому впадает в противоречие. Имея возможность со своих позиций на равных правах критиковать как гипотезу А. А. Беуса, так и гипотезу Н. В. Белова, он почему-то критикует только гипотезу А. А. Беуса. Он пишет, что «корреляция между составом щелочных бериллов и размерами отвечающих им элементарных ячеек... совершенно однозначно указывает на то, что увеличение параметра c решетки щелочных бериллов связано с увеличением среднего ионного радиуса Al—Be слоя в структуре берилла, что при учете химических соотношений приводит к выводу о наличии замещения именно бериллия на щелочные ионы». Последний вывод вызывает недоумение. А почему не Al? Также недостаточно обоснован вывод о положении щелочных ионов в полостях — каналах на уровне Al—Be слоя, на чем мы остановимся еще ниже.

Дир, Хови и Цузмен (Deeg, Howie and Zussman, 1962) провели расчет тринадцати разнообразных анализов берилла на 36 атомов кислорода, на основании чего делают предположение о замещении типа: 2 атома щелочных \rightleftharpoons Be⁺². Однако сомнительно сделанное ими объединение в одну изоморфную группу следующих элементов: Be, Mg, Li, Fe⁺², Na, Ca, K, Cs. Mg и Fe⁺² нельзя объединять вместе со щелочными атомами. Сложная проблема щелочей в бериллах не может быть решена без учета других примесей в его составе, так как все примеси в берилле связаны сложными изоморфными и стехиометрическими соотношениями.

Связанная вода. Как указывал В. И. Вернадский (1908), первым, кто обратил внимание на высокое содержание воды в бериллах (до 1,66%), был Леви. Леви также доказал в 1858 г., что вода эта удаляется при высокой температуре. Позднее, в 1864 г., эти данные были подтверждены Велером. Пенфильд (Penfield, 1884, 1886) в результате многочисленных анализов бериллов обнаружил во многих из них, наряду со щелочами, воду, которую он вводил в формулу берилла в виде катиона — водорода (H₂BeAl₄Si₁₂O₃₂ — формула берилла, по Пенфильду). Сам В. И. Вернадский (1908) считал воду в берилле конституционной, а общую формулу берилла изображал как $n\text{BeSiO}_3 \cdot m\text{H}_2\text{BeSiO}_4 \cdot p\text{BeAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$.

Н. Л. Дилакторский (1931) показал, что основная часть воды из бериллов выделяется в интервале 700—900°. Им сняты первые кривые потерь веса берилла при прокаливании.

Якоб (Jakob, 1938) отмечает, что у некоторых бериллов на формулу приходится 0,5 молекулы воды, Яраман (Jaraaman, 1940) отмечает 0,25 молекулы воды. На молекулярный характер воды в берилле показали исследования инфракрасного спектра берилла Лионом и Кинзеем (Lyon and Kinsey, 1942).

Климен (Kleeman, 1944) считает, что часть SiO₄ в берилле может замещаться на OH, как в гроссуляре. К этому выводу он пришел после пересчета полного химического анализа берилла из Южной Австралии, приведенного к следующей формуле: R₃Al₂Si_{5,75}(O_{16,98}OH_{1,02}).

Детальное исследование воды в бериллах провел А. И. Гинзбург (1955). На основании того, что согласно рентгеновскому изучению структура берилла до и после удаления воды не меняется и что вода при прокаливании выделяется постепенно без термических эффектов, он сделал вывод о ее цеолитном характере.

Выделение цеолитовой воды при высокой температуре из бериллов (600—1200°) объясняется им тем, что вода располагается в узких каналах в структуре берилла.

Ближний инфракрасный спектр поглощения берилла получен Вickersheim и Buchanam (Wickersheim and Buchanam, 1959), которые об-

наружили сильные полосы поглощения в области 3700 см^{-1} и объясняют их колебаниями молекул воды.

А. А. Беус (1960) отмечает, что особенно высокотемпературная вода содержится в щелочных бериллах, и объясняет это частичной закупоркой каналов в структуре берилла атомами щелочей. Он также пишет: «Наибольшее количество воды обычно характерно для щелочных разновидностей берилла, хотя и у бесщелочных бериллов ее содержание в отдельных случаях превышает 2%». Им даны пределы колебаний содержания воды в различных разновидностях берилла.

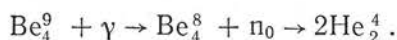
Инертные газы. Инертные газы, особенно гелий, а также аргон, нередко входят в состав берилла. Содержание гелия в берилле колеблется, как указывает А. А. Беус (1960), от 0,2 до $17,20 \text{ мм}^3/\text{г}$.

Сазак (Sasaki, 1926) определял содержание гелия в некоторых японских минералах. В берилле из Ишикавы содержание гелия составляло 0,0027%.

Интересное исследование провел Релей (Rayleigh, 1933). Он определял объемы выделившегося гелия при разложении различных бериллов в КОН при 300° . Среднее содержание гелия увеличивалось с возрастом берилла следующим образом: архей — 6,98 (77,6—0,055) $\text{мл}/\text{г}$, палеозой — 1,47 $\text{мл}/\text{г}$, мезозой — 0,157 $\text{мл}/\text{г}$, третичные бериллы — 0,0758 $\text{мл}/\text{г}$.

Вальке (Walke, 1935) не считает, что содержание гелия в берилле возникает в результате радиоактивного превращения Be^8 или Be . Более вероятно, с его точки зрения, возникновение гелия в берилле в результате бомбардировки γ -лучами от радиоактивных минералов или космическими лучами.

Исследования Крэйна, Лоуритсена (Crane, Lauritsen, 1935) и Е. С. Бурксер и др. (1937) показывают, что гелий в берилле мог возникнуть по следующей реакции:



Е. С. Бурксер, Н. П. Капустин, В. В. Кандогури (1937) выясняли содержание гелия в бериллах разного происхождения и возраста.

Фай, Глюков и Панет (Fay, Glückave and Paneth, 1938) утверждают, что гелий мог возникнуть в берилле за счет распада других элементов, а не бериллия.

Рид (Read, 1939), однако, считает возможным образование гелия в берилле за счет бомбардировки бериллия космическими лучами.

В. Г. Хлопин и М. А. Абишев (1941) нашли, что содержание гелия в различных бериллах колеблется в пределах 0,026—6,430 $\text{мм}^3/\text{г}$. Содержание гелия не обнаружило связи с радиоактивностью, возрастом или содержанием бериллия. Разбирая различные теории происхождения гелия в минералах, авторы делают заключение, что минералы, в том числе и берилл, адсорбируют короткоживущие радиоактивные изотопы или гелий из магмы. Избыточный гелий в бериллах также объясняется захватом из среды кристаллизации (Хлопин, 1949; Чердынцев, Казак, 1949).

По данным В. В. Чердынцева и Л. В. Казака (1949), по 40 образцам наблюдается следующее распределение гелия (в $\text{мм}^3/\text{г}$) в бериллах разных типов:

Высокотемпературные бериллы из пегматитов	0,13—5,35
Среднетемпературные бериллы из пегматитов	0,65—1,7
Низкотемпературные натролитиевые бериллы из альбитизированных пегматитов	0,05—0,74
Ростериты и воробьевиты	0,02—0,64
Берилл из пневматолитов	0,61—1,5

Согласно К. К. Абдулгафарову и В. В. Чердынцеву (1958), обнаруживается различие в процессе выделения радиогенного и нерадиогенного гелия, что указывает на различное состояние гелия разного происхождения в минералах. Коэффициент диффузии гелия для берилла достигает максимума при температуре 400°. Характер выделения гелия бериллами свидетельствует о низкой (ниже 600°) температуре их образования. Помимо гелия в бериллах обнаруживается и избыточное содержание аргона (Герлинг, Полканов, 1958).

Интересное исследование было проведено Дамоном и Кальпом (Damon, Kulr, 1958). Ими установлено, что в изученных образцах берилла, кордиерита и турмалина находится значительное количество гелия и аргона, избыточное против того, которое может образоваться в результате радиоактивного распада. Во многих образцах количество радиогенного He и Ar составляло менее 1% от их общего количества. Изотопный состав He и Ar и отношение He:Ar в кольцевых силикатах резко отличаются от атмосферных. Так, отношение He:Ar колеблется от 0,5 до 130. Содержание гелия в берилле возрастает с увеличением геологического возраста. Делается вывод, что инертные газы были захвачены кристаллизующимся кольцевым силикатом, имеющим большие полости в структуре. Количество и состав захваченного инертного газа должны отвечать парциальному давлению He и Ar в среде кристаллизации.

Другие примеси. Из других примесей внимание исследователей привлекали Cr, Fe, Se и некоторые другие элементы.

Распределение хрома в бериллах (изумрудах) изучалось Хаутфейл и Перреем (Hautefeuille und Perray, 1888). Дольгером (Doelter, 1915), А. Е. Ферсманом (Goldschmidt, 1954), Н. Дилакторским (1931), С. А. Боровиком (1943), Б. А. Гаврусевичем (1946) и др. Однако это изучение только позволило выяснить, что хром характерен для бериллов из месторождений, связанных с ультраосновными породами.

В еще большем числе работ приводятся данные по содержанию в бериллах Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg, Mn, однако так же как и для Cr не дается строгих доказательств определенного положения этих примесей в структуре берилла, хотя большинство исследователей замещают ими алюминий.

Работами С. В. Грум-Гржимайло (1940, 1958) по измерению спектров светопоглощения было показано, что Cr и Fe в структуре берилла (в изумруде, аквамарине, берилле) замещают алюминий в октаэдрической координации.

Госнер и Мусгнуг (Gossner and Mussgnug, 1928) считают возможным замещение Al_2Mg на $SiBeBe_2$. То же подразумевает Фолинсби (Folinsbee, 1941).

Небольшие содержания скандия отмечались в бериллах нередко. С. А. Боровик (1943) изучил распределение Sc в бериллах и установил, что в некоторых аквамаринах он может содержаться в количестве до 0,02—0,03%.

В работе Хютенлохера и др. (Huttenlocher, Hugi und Nowacki, 1954) показано, что скандий может замещать в берилле алюминий на одну треть с образованием разновидности берилла — баццита.

Бергерхофф и Новацкий (Bergerhoff und Nowacki, 1955) считают, что количество Sc составляет в бацците до $\frac{2}{3}$ количества Al и достигает 10%.

Гольдшмидт (Goldschmidt, 1954) указывает, что в некоторых изумрудах (из битуминозных карбонатных пород) наблюдалось значительное содержание ванадия (0,9% максимально), превышающее содержание хрома. По Беусу (1960), содержание V_2O_5 составляло в берилле 0,09%.

Высокое содержание фосфора в берилле (0,27%) обнаружено Шаллером и др. (Schaller, Stevens and Tahus, 1962), по нашим данным — 3,60% P_2O_5 .

Шредер (Schröder, 1941) указывает содержание 0,1—1% Sn в бериллах из турмалин-сланцевых пегматитов Турции.

Высокое содержание Nb_2O_5 (1,75%) и ZrO_2 (0,80%) отмечено П. П. Сушинским (1923) в аквамарине из Сибири, что, по всей вероятности, обусловлено загрязнением анализированного материала или ошибкой анализа (аналитик Г. П. Черник).

Кроме Роблинга и Тромова (Roebing, Trommav, 1935) (табл. 7), высокое содержание бора (0,12—0,16%) в бериллах из гранитных пегматитов отмечал П. М. Татаринов (1937).

CO_2 , Cl и S, найденные в некоторых бериллах, по-видимому, относятся к содержимому газовой-жидких включений. Павловић, Николић (1960) определили в берилле 0,47% CO_2 , 0,02% S; Симпсон (Simpson, 1948) — 0,02% CO_2 ; А. А. Беус (1960) — 0,02% Cl, следы SO_3 .

Совершенно необычным бериллом с точки зрения содержания примесей является бацит. По спектральному анализу Хютенлехер и др. (Huttenlocher, Hugi und Nowacki, 1954) отмечают в баците, кроме обычных элементов (характерных для берилла: Be, Si, Al, Mg, Ca, Na, Fe, присутствующих в значительных количествах), также Sc, примеси: Ga, V, Sn, Yb, Y, Cu, Ag, Ba, Sr. По данным Берталани (Bertalani, 1948), элементы группы редких земель, присутствующие в баците, состоят из: Y, La, Ce, Yb, Dy, Gd и Nd.

Объяснение положения всех главнейших примесей сразу в структуре берилла стало проводиться недавно, после выяснения некоторых частных закономерностей по вхождению отдельных примесей в структуру берилла. Первые попытки в этом направлении сделали Махачки (Machatschki, 1928, 1931) и Шибольд (Schiebold, 1935). Согласно этим исследователям, в берилле осуществляется сложный изоморфизм, когда Al может замещаться Mg, Fe, Mn, Li, большие катионы щелочных металлов вместе с водой размещаются в каналах в структуре берилла. Возможен также изоморфизм Be—Al и O^{2-} — OH^{1-} .

Нами (Фекличев, 1963) были подробно рассмотрены в их совокупности основные химические особенности берилла, изоморфизм и положение в нем главнейших примесей. Изложение этого материала с дополнением дается нами после настоящего обзора.

Независимо от наших исследований появились две важные работы, посвященные исследованию берилла.

В. В. Бакакин, Н. В. Белов (1962) свою работу посвятили дальнейшему исследованию вопроса о роли и конкретном размещении в структуре берилла молекул H_2O и крупных катионов. Авторы исходили из того, что при возникновении дефицита положительных зарядов в структуре берилла в полости вводятся дополнительные катионы. Однако полости в структуре берилла малы для катионов Na и Ca (положение между кольцами в том же слое) и слишком велики даже для Cs (положение в стволе между кольцами). Поэтому катионы щелочных и щелочноземельных элементов помещаются между «распорками» из молекул воды, которые располагаются в центрах из колец Si_6O_{18} . Максимальное количество буферных групп НОН равно числу колец, т. е. одна на формулу. Между буферными группами остается зазор в ~ 2 Å, в котором могут размещаться преимущественно Na и Ca благодаря их подходящим размерам. Cs может располагаться, контактируя с одной стороны с молекулой H_2O , а с другой — непосредственно с кольцом Si_6O_{18} . Промежуточные размеры K и Rb объясняют, по мнению авторов, обычное отсутствие этих элементов в берилле. Маленький Li располагается вместо Be, Al или в межкольцевых пустотах, но не в каналах.

Авторы полагают, что пересчет анализов берилла на 18 атомов О более правилен, чем на Si₆, и приводят в качестве фактического материала, обосновывающего их заключения, пересчет 40 анализов берилла по материалам А. И. Гинзбурга (1955). Высокотемпературный характер цеолитной воды в берилле объясняется выполняемой ею ролью «распорки» при взаимодействии со всей структурой в целом.

Представления о буферной роли воды, развиваемые в работе В. В. Бакакина и Н. В. Белова, впервые объяснили многие особенности в кристаллохимии берилла. Однако не все положения согласуются с фактическими материалами, в частности, неверно утверждение, что К и Rb не могут накапливаться в бериллах в значительных количествах. Размещение молекул воды в центрах колец Si₆O₁₈ энергетически не оправдано.

В связи с исследованием необычного берилла сложного состава Шаллер, Стевенс и Янс (Schaller, Stevens and Jahns, 1962) рассматривают изоморфизм и положение атомов в структуре берилла. Химический анализ исследованного берилла представлен в табл. 8.

Пересчет этого анализа Шаллером и другими привел к следующему соотношению атомов, которые они распределили в разные координации (табл. 7).

Замечательной особенностью изученного берилла является присутствие значительного количества щелочей при сохранении всего берил-

Таблица 7

Расчет атомных отношений берилла № 54
(по Шаллеру и др.)

Координация	Анализ	Эквивалентные отношения			
		<i>e</i>	<i>e'</i> =6,0424	Атомные отношения	
Тетраэдрическая	{SiO ₂ 59,52	3,9627	23,944	Si 5,986	
	{BeO 12,49	0,9984	6,033	Be 3,017	
			Σ _{тетр.}	9,003≈9,00	
	{Al ₂ O ₃ 10,63	0,6257	3,781	Al 1,260	
	{Fe ₂ O ₃ 2,08	0,0781	0,472	Fe ³⁺ 0,157	
	{Cr ₂ O ₃ 0,09	0,0036	0,022	Cr 0,007	
	{Sc ₂ O ₃ 0,10	0,0043	0,026	Sc 0,009	
			Σ _{трехвал.}	1,433	
	Октаэдрическая	{FeO 2,24	0,0623	0,376	Fe ²⁺ 0,188
		{MnO 0,29	0,0082	0,050	Mn 0,025
{MgO 2,16		0,1071	0,647	Mg 0,327	
			Σ _{фемаг.}	0,537	
{Li ₂ O 0,23			0,093	Li 0,093	
		Σ _{окт.} 5,467	2,063≈2,06		
Большие катионы	{Na ₂ O 1,16	0,0374	0,226	Na 0,226	
	{K ₂ O 0,16	0,0034	0,020	K 0,020	
	{Cs ₂ O 6,68	0,0474	0,286	Cs 0,286	
	{CaO 0,11	0,0039	0,024	Ca 0,012	
				0,544≈0,54	
		Σ <i>e</i> =5,9579	Σ _{больш. катионы} =0,556		
			Σ <i>e'</i> =36,000		

$$\text{Пересчетный фактор } e' = \frac{\Sigma e'}{\Sigma e} = \frac{36}{5,9579} = 6,0434.$$

лия в структуре. В то же время в этом берилле наблюдается резкий недостаток Al при высоком содержании Mg, Fe²⁺, Fe³⁺.

Крупные катионы щелочей и Ca Шаллером и другими помещаются в центры «карманов» между двумя кольцами Si₆O₁₈, а небольшое количество Li замещает Al. Шаллер и другие выразили состав берилла в виде конечных членов выделенных ими рядов изоморфизма:

Конечный член	Формула	Формульный %
Стандартный берилл . . .	Be ₃ R ₂ ³⁺ Si ₆ O ₁₈	36
Литиевый берилл	(Na, Cs) BeAlAlLiSi ₆ O ₁₈	9
Железо-магнезиальный берилл	(Na, KCs) Be ₃ R ³⁺ R ²⁺ Si ₆ O ₁₈	55
		100

R³⁺ представлен Al, Fe³⁺, Cr и Cs, а R²⁺ — Fe²⁺, Mn и Mg.

Содержание и положение щелочей, щелочных земель, железа и воды в берилле в зависимости от генетических и кристаллохимических факторов

Ниже мы попытаемся обосновать определенную форму вхождения в структуру берилла таких важных примесей, как щелочноземельные элементы, железо, имеющие существенное влияние на физические свойства берилла, а также еще раз остановимся на проблеме щелочей и воды. Основным материалом для наших заключений является сводка анализов разновидностей берилла (табл. 9).

Щелочи отсутствуют в очень редких бериллах. К ним относятся бериллы из отдельных гидротермальных месторождений, из грейзеновых месторождений, связанных с кислотным выщелачиванием, и из некоторых занорышей в пегматитах. Любая из щелочей может в специфических условиях входить в состав берилла в значительных количествах, более 1,5%.

По мере накопления общего количества щелочей в бериллах изменяется соотношение между щелочами. В слабощелочных (0,5—1% R₂O) бериллах из незамещенных пегматитов K, как правило, преобладает над Na, а редкие щелочи практически отсутствуют (табл. 8, 9). Бериллы, отлагающиеся в период натриевого метасоматоза пород (в замещенных пегматитах, в некоторых грейзенах, в альбитизированных и грейзенизированных гранитах и гранодиоритах, в метасоматически измененных змеевиках), характеризуются низкими содержаниями K и всегда преобладающими содержаниями Na (табл. 10). Накопление редких щелочей (Li, Cs, Rb) в бериллах характерно для заключительных стадий пегматитового процесса (табл. 8).

Таким образом, классификация бериллов по степени и характеру щелочности представляется в следующем виде:

	R ₂ O %
I. Бесщелочные бериллы	0
II. Слабощелочные калиевые и натро-калиевые бериллы	0,5—1
III. Щелочные натровые бериллы	1—2
IV. Сильнощелочные бериллы с редкими щелочами (Li, Cs, Rb)	2—7

Щелочные земли могут входить в состав берилла в значительных количествах. Когда в бериллах с высокими значениями удельного веса и с низким содержанием BeO удвоенного количества атомов щелочей не хватает для полной компенсации недостающего бериллия, в таких бериллах содержатся значительные количества кальция, полностью

Состав	Бесщелочные		Слабощелочные калиевые и натриево-калиевые				Щелочные натровые			
	занорыш пегматита КНР; Бусе (1960)	кварц-топазовые грейзены, Сиора, Суцзинский (1928)	занорыш пегматита КНР; наши данные	занорыш пегматита, Европейская часть СССР; наши данные	пегматиты, Казахстан; Бусе (1960)	пегматиты, Казахстан; Бусе (1960)	замещенные пегматиты, КНР; Бусе (1960)	замещенные пегматиты, Средняя Азия; Ибодуллаев (1968)	замещенные пегматиты; Квенсел (Quenkel, 1937)	грейзенизированные гранодиориты, ДВК; наши данные
SiO ₂	64,31	65,73	65,60	64,86	65,54	65,48	64,00	65,50	64,16	64,95
TiO ₂	0,03	—	—	—	—	—	—	—	—	Не обн.
Al ₂ O ₃	18,71	17,23	16,96	19,35	19,63	18,46	17,94	17,95	18,73	16,95
Fe ₂ O ₃	0,64	1,47	0,74	0,62	0,63	0,80	0,74	1,30	0,28	1,27
FeO	Нет	—	—	—	0,13	0,13	—		—	—
MnO	0,01	—	—	—	—	Следы	—	0,03	—	Следы
MgO	0,08	—	0,40	0,30	0,18	0,07	0,21	0,15	—	Следы
CaO	0,18	—	1,52	0,20	0,46	0,55	0,76	0,24	—	1,20
CrO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
aO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na ₂ O	Следы	—	0,42	0,14	0,15	0,07	0,82	1,32	1,27	1,50
K ₂ O	—	—	0,76	0,25	0,36	0,27	—	—	0,39	0,75
Li ₂ O	—	—	0,03	0,024	—	—	—	—	0,08	0,007
Cs ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	0,42	0,024
Rb ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
BeO	13,98	13,39	12,74	13,29	12,38	13,70	13,32	13,34	12,98	11,93
H ₂ O ⁻	—	—	0,22	—	—	—	—	—	—	0,15
H ₂ O ⁺	2,22	1,05	0,81	0,32	0,36	0,42	2,00	0,20	—	—
П.п.п.	—	—	—	0,28	—	—	—	—	—	1,63
Сумма	100,13	99,87	100,17	99,53	99,82	99,95	99,79	100,03	99,77	100,35
Ана- итик	С. Н. Федорчук	М. Е. Славский	И. С. Разина	З. Т. Катаева	А. Н. Пономарев	С. Н. Федорчук	—	—	—	З. Т. Катаева

*0,077 Cr₂O₃; ²0,25 Cr₂O₃; ³0,02 CO₂; ⁴*2,00 Cr₂O₃; ⁵*0,27 P₂O₅; 0,09 Cr₂O₃; 0,10 Se₂O₃.

компенсирующие вместе со щелочами недостающее количество берилля (табл. 10). Таким образом, кальций в структуре берилла ведет себя подобно щелочным атомам. Вместе с кальцием и щелочными атомами безусловно должны в силу их химического и кристаллохимического сродства к указанным элементам располагаться стронций и барий. Они в бериллах обычно не анализируются, но, как показали исследования Замбонини и Каглиоти (Zambonini e Caglioti, 1928) и наши, в некоторые бериллы (щелочные) при специфических условиях они могут входить в существенных количествах (табл. 11).

Таким образом, представляется возможным наряду с щелочными бериллами выделять и щелочноземельные кальциевые бериллы. Так как значительные количества Ва и Sr, как правило, содержатся в щелочных бериллах, выделять стронциевые и бариевые бериллы в особую группу нет необходимости.

Магний и железо нельзя в структуре берилла помещать с щелочными и остальными щелочноземельными элементами, так как наблюдается обратно пропорциональная зависимость между количеством Mg, Fe и Al в берилле при значительном содержании в нем магния и железа (табл. 12).

Бериллов разных типов

Сильнощелочные с редкими щелочами (Li, Rb, Cs)				Слабощелочноземельные			Сильнощелочноземельные			Изумруд	Берилл смешанного состава
замесленные пегматиты, Сибирь; Ненайден ч (1911)	пегматиты, Европейская часть СССР; Соседко (1957)	пегматиты, КНР; Бейсе (1960)	пегматиты, Южная Австралия; Симпсон (Simpson, 1948)	гидротермальные жилы в карбонатных породах, Мозо, Колумбия; Замбонини и Каглиоти (1928)	пегматиты скандинавии; СССР; Власов, Кутукова	биотитовые сланцы, Казахстан; наши данные	пегматиты скандинавии, СССР; Власов, Кутукова,	биотитовые сланцы, Хабахталь; Якоб (Jakob, 1938)	пегматиты, Южная Австралия; Симпсон (Simpson, 1948)	синтетический, Горгес и Шпритсен (Gorgers and Spreisen, 1942)	пегматиты в габридных породах (Schaller, Stevens and Johns, 1962)
62,84	61,88	62,76	64,64	65,26	66,03	65,50	64,69	63,10	60,58	64,30	59,52
	0,01	—	—	—	—	Необн.	Необн.	0,04	—	0,05	0,05
18,34	17,10	19,75	19,10	17,60	18,95	17,92	15,16	14,08	14,65	18,65	10,63
Следы	0,08	0,06	0,14	0,09	0,42	0,90	0,35	—	1,39	0,30	2,08
—	—	—	Нет	—	—	Необн.	—	0,70	Следы	—	2,24
0,04	—	0,05	Следы	0,06	—	Неопр.	Следы	0,030	0,07	—	0,29
0,24	0,22	Следы	Нет	0,77	0,21	0,38	1,89	3,37	1,18	0,10	2,16
—	0,44	Следы	Нет	0,69	0,78	0,75	0,80	3,31	3,98	0,73	0,11
—	—	—	—	0,015	—	Неопр.	—	—	—	—	—
—	—	—	—	0,16	—	Неопр.	—	—	—	—	Не обн.
Следы	2,50	1,27	0,31	0,50	0,65	0,86	1,80	2,32	1,12	0,56	1,16
—	—	—	Следы	0,22	0,55	0,26	Следы	0,29	Следы	0,21	0,16
1,39	0,60	0,83	0,17	0,105	0,105	Необн.	—	—	0,97	—	0,23
3,10	4,13	1,14	1,72	—	0,095	—	—	—	0,92	—	6,68
—	—	—	1,42	—	—	—	—	—	Нет	—	—
11,45	10,54	12,66	11,32	13,20	12,33	12,03	13,37	11,07	12,00	13,20	12,49
—	0,16	—	—	1,84	0,55	Необн.	Необн.	Нет	—	0,14	1,62
1,92	2,26	1,35	1,21	—	—	0,64	1,29	2,76	3,00	—	—
—	—	2,40	—	—	—	0,71	—	—	—	—	—
99,92	99,92	99,87	100,03	100,58*	100,67	99,95	99,60**	100,07	99,78**	100,24**	9,85*
Ненайден ч	Е. Н. Егорова	В.С. Салтыкова	Д.Д. М.	Замбонини и Каглиоти	И. С. Разина	З. Т. Катаева	Н. Е. Казакова	Якоб	Е.С.С.	Куртис и Топкинс	

Многочисленные химические анализы бериллов показывают, что в относительном количественном содержании различных щелочных атомов и кальция в каждом отдельном берилле отсутствуют закономерности, обусловленные кристаллохимическими факторами (определенные соотношения и сочетания атомов в зависимости от размера иона), а существуют закономерности, обусловленные генетическими факторами. Относительно щелочей это уже говорилось. То же характерно и для вхождения кальция в состав берилла. Содержание повышенных количеств окиси кальция характерно для бериллов из месторождений, развитых среди карбонатных, основных и ультраосновных пород. Кальций, как правило, не характерен для бериллов, обогащенных редкими щелочами и выделяющихся на последних стадиях пегматитового процесса. В табл. 13 представлены характерные соотношения между щелочами и окисью кальция, подтверждающие вышеизложенное. Это доказывает невозможность разбивки щелочей (а также окиси кальция) на две равных группы (с малым и большим размером ионного радиуса), занимающие обязательно разные позиции в структуре берилла, как это делалось ранее.

Хотя и редко, но в специфических условиях наблюдаемые высокие содержания Rb_2O (1,42, 1,09%), K_2O (2,25, 0,76%), CaO (3,98, 3,31%),

К и Na в бериллах из незамещенных гранитных пегматитов (в вес.%)

А. K_2O и Na_2O

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
K_2O	0,27	0,20	0,36	—	0,04	0,25	0,25	0,76
Na_2O	0,07	0,14	0,15	0,22	0,46	0,23	0,14	0,42
Источник или аналитик	Беус, 1960	Беус, 1960	Беус, 1960	Беус, 1960	Беус, 1960	Беус, 1960	Катаева З. Т.	Разина И. С.

I — зеленовато-серый, Казахстан; II — синеватый, Казахстан; III — желтовато-кремовый, Казахстан; IV — голубовато-зеленый, Сибирь; V — светло-зеленый, Европейская часть СССР; VI — оливково-зеленый, Европейская часть СССР; VII — салатно-зеленый, Европейская часть СССР; VIII — желто-зеленый, КНР.

Б. К и Na

	I	II	III	IV	V
K	0,44	0,52	0,24	0,40	0,29
Na	0,13	0,42	0,36	0,13	0,076
Аналитик	Г. Н. Попова	Г. Н. Попова	Г. Н. Попова	Г. Н. Попова	Н. Г. Тоноян

I — оливково-зеленый, Европейская часть СССР; II — голубой, КНР; III — голубой, КНР; IV — салатно-зеленый, Европейская часть СССР; V — синий, КНР.

BaO (0,58%), SrO (0,06%) доказывают несостоятельность кристаллохимического объяснения ограниченности вхождения Rb, K, Ca, Ba и Sr в структуру берилла. Вхождение указанных компонентов в берилл, так же как и Na, Li и Cs, зависит от конкретных генетических факторов. Na, а также Li и Cs наиболее характерные химически активные элементы месторождений, в которых кристаллизуются многие бериллы.

Таблица 10

Состав щелочно-земельных бериллов (в вес.%)

Окислы	I	2	3
CaO	2,31	3,97	2,55
R_2O	2,61	3,10	3,35
BeO	11,07	12,00	9,71
H_2O	2,76	3,00	3,07
Уд. вес	2,78	2,79	—

1 — по Якобу (Jakob, 1938); 2 — по Симпсону (Simpson, 1948); 3 — по Замбонини и Каглиоти (Zamboninie Caglioti, 1928).

Совсем другого рода соотношения наблюдаются между водой и щелочами и щелочными землями. При просмотре всех известных нам по литературе химических анализов, включая сводки Хинце (Hintze, 1897), Дольтера (Doelter, 1917), А. И. Гинзбурга (1955), А. А. Беуса (1960), было обнаружено, что в слабощелочных бериллах молекулярное количество воды может превосходить количество атомов щелочных и ще-

Sr и Ba в щелочных бериллах (в вес.%)

А. Данные Замбонини и Каглиоти (Zambonini e Caglioti, 1928)

Бериллы с о. Эльба	гО	ВаО	R ₂ O
I	0,02	0,19	7,81
II	0,06	0,21	1,04
III	0,01	0,15	0,80
IV	0,015	0,16	0,825

Б. Данные автора *

Месторождение	Sr	BaO	R ₂ O
Розовый берилл из пегматитов, КНР (материал В. Г. Хрюкина)	Не обн.	0,5	1,04
Бледно-зеленый берилл из пегматитов, Европейская часть СССР (материал А. И. Калиты)	0,022	0,5	3,77
Бледно-желтый берилл из пегматитов, КНР (материал Н. Е. Залашковой)	0,003	0,5	0,86
Молочно-серый берилл из пегматитов, Европейская часть СССР (материал Т. А. Соседко) . .	Не обн.	0,54	3,29

* Определено фотометрией пламени; аналитик Г. Н. Попова.

лочноземельных элементов, но в сильнощелочных бериллах характерно отношение их, в пределе близкое к 1 (табл. 14).

Максимальные количества щелочей и щелочных земель (без магния) в берилле не превышают 7—8%, а воды — 2,8—3%. В природе не был

Таблица 12

Содержание Al₂O₃, MgO и Fe₂O₃ в обогащенных Mg бериллах (в вес.%)

Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Источник
19,00	—	—	Теоретическое значение
18,03	0,52	0,50	Симпсон (Simpson, 1948)
17,75	1,37	0,48	Беус (1960)
17,21	1,81		Дольтер (Doelter, 1917)
15,16	1,89	0,35	Власов, Кутукова
14,55	1,18	1,39	Симпсон (Simpson, 1946)
14,58	1,16	0,52	Дольтер (Doelter, 1917)
14,08	3,37	0,70*	Якоб (Jakob, 1938)
10,63	2,16	2,08+ +2,24 FeO	Шаллер и др. (Schaller, Stevens and Jahns, 1962)

* Определено в виде FeO.

встречен берилл, где бы щелочные атомы полностью замещали бериллий — гипотетический щелочной берилл с формулой: R₃⁺¹Al₂Si₆O₁₈.

По-видимому, стоит поставить вопрос об ограниченном гетеровалентном изоморфизме между бериллием, щелочными и щелочноземельными

Соотношения щелочных атомов и кальция в щелочных и щелочноземельных бериллах

Оксиды	Калиевый		Калиево-кальциевые				Кальциевые				Кальциево-натриевые				Натриевые				
	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆			
K ₂ O	0,25	0,03	0,27	0,03	0,36	0,04	—	0,76	0,08	0,29	0,03	0,75	—	0,26	0,03	—	0,39	0,05	
CaO	0,20	0,02	0,55	0,05	0,46	0,04	0,46	0,05	1,52	3,31	0,34	1,20	0,80	0,75	0,07	0,26	—	—	
Na ₂ O	0,14	0,02	0,07	0,02	0,15	0,03	—	0,42	0,07	2,32	0,43	1,50	1,80	0,86	0,15	1,45	1,27	0,25	
Li ₂ O	0,024	—	—	—	—	—	—	0,03	0,01	—	—	0,007	—	—	—	—	0,08	0,04	
Ca ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,42	0,02	
Rb ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Порода	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Грейзены	Пегматиты	Пегматиты	Биогитовые сланцы	Грейзены	Пегматиты	Пегматиты	Биогитовые сланцы	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты
Источник	Данные автора	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Данные автора	Данные автора	Якоб (Якоб, 1938)	Данные автора	Власов, Ку-тукова	Ибадуллаев (1958)	Данные автора	Ибадуллаев (1958)	Ибадуллаев (1958)	Ибадуллаев (1958)	Ибадуллаев (1958)	Ибадуллаев (1958)

Таблица 13 (окончание)

Оксиды	Литиево-натриевые				Натриево-литиевые				Литиевый				Цезиево-литиевый				Рубидиевый			
	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆	вес. %	пересчет на Si ₆		
K ₂ O	0,11	0,01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
CaO	—	—	0,26	0,03	0,44	0,05	0,44	0,05	0,63	0,07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Na ₂ O	1,18	0,22	1,27	0,21	2,50	0,47	1,39	0,26	1,27	0,23	1,27	0,24	0,71	0,07	—	—	0,31	0,06	—	
Li ₂ O	0,45	0,22	0,30	0,10	0,60	0,23	1,23	0,44	0,77	0,27	0,83	0,32	0,66	0,24	1,39	0,48	0,17	0,06	—	
Ca ₂ O	—	—	0,27	0,01	4,13	0,17	0,67	0,02	—	—	1,14	0,05	0,92	—	3,10	0,13	1,72	0,06	—	
Rb ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,42	0,08	—	
Порода	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты	Пегматиты
Источник	Беус (1960)	Сседко (1957)	Сседко (1957)	Сседко (1957)	Сседко (1957)	Сседко (1957)	Сседко (1957)	Сседко (1957)	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Беус (1960)	Ненадкевич (1911)	Симпсон (Simpson, 1948)	Симпсон (Simpson, 1948)

атомами, ограниченность суммарного вхождения щелочей и воды в структуру берилла можно тогда объяснить только с кристаллохимических позиций. Указанным компонентам после предельно наблюдаемого вхождения в структуру берилла нет больше места в ней.

Поскольку всеми гипотезами принимается хотя бы частичное помещение атомов щелочей в так называемые каналы из кремнекислородных

Таблица 14

Количество возможных пустот, атомов Be, щелочных и щелочноземельных атомов (без Mg) и молекул воды в одной элементарной ячейке сильнощелочных бериллов

А. Атомы металлов и молекулы воды

Атомы Be	5,2	5,32	5,2	4,8	5,71	От 4 до 5
Щелочные атомы и щелочноземельные (без Mg)	1,72	1,64	1,58	1,63	2,11	2
Молекулы воды	1,6	1,5	1,6	1,5	2,2	2
Источник	Дольтер (Doelter, 1917)	Беус (Beus, 1960)	Сосёдко (Sosedko, 1957)	Хинце (Hinze, 1897)	Симпсон (Simpson, 1948)	Теоретическое предельное значение

Б. Пустоты

24-вершинники	2	Ромбические призмы	6
Тригональные призмы	4	Тетраэдры	От 1 до 2

колец, мы задались целью выяснить вопрос о форме и размерах этих каналов для того, чтобы конкретно судить о том, сколько в них сможет разместиться щелочей. При расчетах были использованы результаты структурного изучения берилла (Bragg and West, 1926; Белов и Тархова, 1951; Белов и Матвеева, 1951) и модель кристаллической структуры берилла из коллекции рентгеноструктурной лаборатории ИМГРЭ АН СССР.

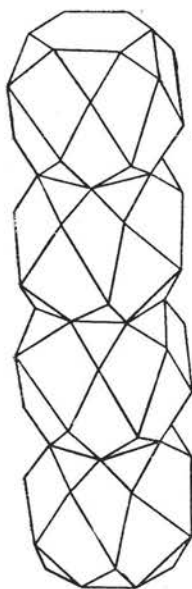
Так называемые каналы представляют бесконечные колонки из полых полиэдров — 24-вершинников (фиг. 3). 24-вершинник является комбинацией пинакоидов с двумя гексагональными трапецоэдрами. Высота 24-вершинника вдоль оси *C* у бесщелочного берилла около 4,6 Å.

Интересно, что колонки, составленные из таких четок и представляющие сквозные каналы, имеют неодинаковую ширину. Это четковидные каналы. Максимальный диаметр внутренней полости 24-вершинника — «четки» находится в плоскости Al — Be слоя. В плоскости слоя Si диаметр отверстия, соединяющего два 24-вершинника, равен примерно лишь диаметру иона кислорода (около 2,6 Å). Расстояние от центра внутреннего атома кислорода кольца Si₆O₁₈ до центра кольца равно 2,55 Å. Это заставляет скептически относиться к предположениям о неупорядоченном положении щелочей и воды в каналах в структуре берилла.

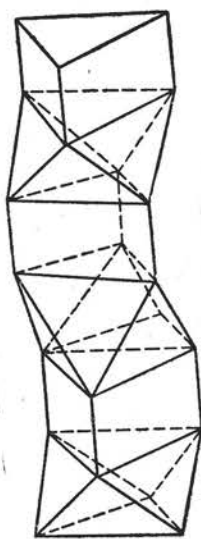
Кроме 24-вершинников, в структуре бесщелочного берилла имеются еще два типа пустот. Это тригональная призма, чередующаяся с октаэдрами с Al в бесконечных колонках параллельно оси *C* (фиг. 4). Это своеобразная ромбическая призма с двумя осложненными противоположными гранями призмы. Осложнение представляет короткую четырехугольную пирамидку на грани призмы. Такие призмы чередуются с тетраэдрами BeO₄ в бесконечных колонках параллельно оси *C* (фиг. 5).

Четвертый тип пустот возможен в щелочных бериллах. Это пустые тетраэдры, в которых должны были бы располагаться недостающие атомы бериллия. Представляется интересным выяснить количество пустот по отношению к количеству щелочей в берилле.

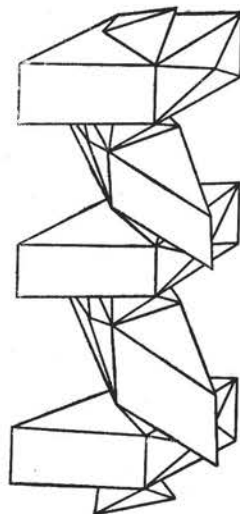
В табл. 14 представлены количества пустот всех типов в структуре берилла и количества атомов бериллия, щелочей, щелочных земель (кроме магния) и воды в бериллах, характеризующихся максимальным содержанием щелочей, щелочных земель и воды. Из нее видно, что в одной элементарной ячейке берилла максимальное количество атомов щелочей и щелочных земель в пределе близко к двум, а молекул воды — также близко к двум.



Фиг. 3. Колонка из 24-вершинников



Фиг. 4. Колонка из чередующихся октаэдров и тригональных призм



Фиг. 5. Колонка из чередующихся тетраэдров и усложненных ромбических призм

Мы видим, что предельное количество щелочных атомов и щелочноземельных атомов в одной элементарной ячейке берилла, так же как и количество молекул воды, равно количеству пустот типа 24-вершинников. Эти закономерности, по-видимому, не случайны. Ввиду неравенства количества остальных типов пустот количеству щелочей и воды щелочи и воду помещаем только в 24-вершинники.

В. А. Франк-Каменецкий и Т. А. Соседко (1958), помещая щелочи в центры 24-вершинников, не учли высокого содержания воды в щелочных бериллах. Но вместе с водой атомы щелочей не поместятся в 24-вершиннике, если последние помещать на уровне Al — Be слоя. Остается их поместить друг над другом, поскольку наиболее энергетически выгодная их позиция будет такая, когда молекулы воды будут находиться в центрах 24-вершинников на уровне Al — Be слоя, а щелочные и щелочноземельные атомы — в шестерном окружении атомов кислорода на уровне слоя Si.

Нейтральные молекулы воды в крупных полостях 24-вершинниках — «корзинах» из атомов кислорода — более устойчивы, чем заряженные атомы щелочей и щелочных земель.

Для любых, даже наиболее крупных ионов или молекул воды, если их поместить в центр «корзины» между кольцами Si_6O_{18} , неизбежны колебания ввиду большого размера корзины. Но сильные колебания нейтральной воды можно допустить, а колебания катионов нельзя. Катионы в кольце из ионов кислорода, несущих часть некомпенсиро-

ванных отрицательных зарядов, прочнее удерживаются, чем нейтральные молекулы воды. Кислороды молекул воды повышают координацию атомов щелочей и щелочных земель до 8, когда последние расположены в центрах своеобразных полиэдров типа коротких гексагональных дипирамид, образующих колонки, параллельные оси *C* (фиг. 6). Разные размеры стандартных ионных радиусов щелочных и щелочноземельных атомов, помещаемых в кремнекислородное кольцо, не должны нас смущать, если учитывать явления взаимной поляризации указанных катионов и ионов кислорода и эффективные ионные радиусы. Нейтральная молекула воды, распирающая два катиона приспособляясь к их размерам, может сжиматься и растягиваться.

Можно предполагать только очень незначительное замещение Al на Li, поскольку их ионные радиусы близки. По-видимому, это наблюдается в розовых бериллах, всегда содержащих литий, а также Mn.

Значительные масштабы замещения Al на Li не согласуются с постоянством Al в щелочных и бесщелочных бериллах, не содержащих Mg и Fe в значительных количествах.

Теоретически в максимально обогащенных щелочными землями бериллах (без учета Mg) количество атомов бериллия в формуле может доходить до двух, в то время как в максимально обогащенных щелочными бериллах до 2,5. Наиболее низкое содержание BeO в щелочных бериллах 10—11%. Максимально обогащенные щелочными землями бериллы в природе пока не обнаружены. Но можно предположить, что в таких бериллах содержание BeO будет около 8%. Об этом говорит то, что в бериллах, содержащих по несколько процентов CaO при среднем количестве щелочей, количество BeO снижается до величины, характерной для самых щелочных бериллов, — около 11% (табл. 10). Согласно Бернауеру (Bernauer, 1926), в изумрудах из Мюзо содержание BeO может доходить до 8,7; 9,7%.

Бериллы, наиболее обогащенные Ca и Mg, необходимо искать в изумрудоносных месторождениях среди ультраосновных, основных и карбонатных пород, богатых Ca и Mg. Возможен и синтез их, так же как и синтез максимально обогащенных щелочными бериллов. Последним окончательно будет решен вопрос о пределе ограниченного вхождения щелочей и щелочных земель в берилл.

Изоморфизм замещения между Al^{+3} , Fe^{+3} , Cr^{+3} , Sc^{+3} носит изовалентный характер. Замещение алюминия на Mg^{+2} и Fe^{+2} гетеровалентно и требует увеличения заряда в остальной катионной части. Это осуществляется путем вхождения ионов щелочей или щелочных земель в каналы без удаления ионов бериллия. Последнее обстоятельство находит подтверждение в анализе щелочноземельного берилла из работы Симпсона (Simpson, 1948) (табл. 8, 14). В последнее время высказанное нами положение было подтверждено Шаллером и др. (Schaller, Stevens and Jahns, 1962).

Таким образом, наиболее вероятно, что из элементов-примесей, играющих существенную роль в берилле, Fe, Mg (Li) замещают Al в шестерной координации, Li, Na, K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba располагаются в центрах колец Si_6O_{18} , молекулы воды располагаются между кольцами Si_6O_{18} в центре 24-вершинников из атомов кислорода.



Фиг. 6. Колонка из гексагональных дипирамид с атомами щелочей в центрах последних

Главные ряды изоморфизма в берилле

В связи со сказанным изоморфизм в бериллах можно выразить в виде формул, характеризующих состав мишалов изоморфных рядов:

I. Общая формула щелочного берилла (Гинзбург, 1955) — $R_x^+ \text{Be}_3 - \frac{x}{2} \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{18}$; $x = 0-1$; R^+ — щелочной ион.

II. Мишалы изоморфного ряда щелочных бериллов — $\text{Be}_3 \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{18} - R^+ + \text{Be}_{2,5} \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{18}$.

III. Общая формула щелочноземельного берилла (без Mg) — $R_y^{2+} \text{Be}_{3-y} \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{18}$; $y = 0-1$; R^{2+} — щелочноземельный ион.

IV. Мишалы изоморфного ряда щелочноземельных бериллов (без Mg) — $\text{Be}_3 \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{18} - R^{2+} \text{Be}_2 \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{18}$.

V. Общая формула сложных щелочных и щелочноземельных бериллов (без Mg) —

$$R_x^+ R_y^{2+} \text{Be}_3 - \frac{x+2y}{4} \text{Si}_6 \text{O}_{18}; \quad x + y = 0-2.$$

VI. Мишалы изоморфного ряда сложных щелочных и щелочноземельных бериллов (без Mg) —

$$\text{Be}_3 \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{18} - R_{1-n}^+ R_{2,5-\frac{n}{1}}^{2+} \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{18}; \quad n = 0-1.$$

VII. Общая формула аквамарина, изумруда и бацитита

$$\text{Be}_3 \text{Al}_{2-\alpha} R_\alpha^{+3} \text{Si}_6 \text{O}_{18}; \quad \alpha = 0-2; \quad R^{+3} \text{ — ионы } \text{Fe}^{+3}, \text{Cr}, \text{Sc}.$$

VIII. Мишалы изоморфного ряда аквамарина, изумруда и бацитита

$$\text{Be}_3 \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{18} - \text{Be}_3 R_2^{3+} \text{Si}_6 \text{O}_{18}.$$

IX. Общая формула ферри-магнезиально-щелочных бериллов

$$R_\beta^+ \text{Be}_3 \text{Al}_{2-\beta} M_\beta^{+2} \text{Si}_6 \text{O}_{18}; \quad \beta = 0-1; \quad M^{+2} \text{ — ионы } \text{Fe}^{+2}, \text{Mg}.$$

X. Мишалы изоморфного ряда ферри-магнезиально-щелочных бериллов

$$\text{Be}_3 \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{18} - R^{+1} \text{Be}_3 \text{Al} M^{+2} \text{Si}_6 \text{O}_{18}.$$

Закономерности компенсации гетеровалентного изоморфизма; Al — Be, Be — Si, B^{+3} — Si, P^{+5} — Si, Li — Al еще недостаточно ясны.

Зависимость параметров элементарной ячейки берилла от химического состава

Выше говорилось о том, что данные по бериллу из Аризоны частично не согласуются с данными В. А. Франк-Каменецкого и Т. А. Соседко (1958) по щелочным бериллам в закономерностях изменения параметров от количества щелочей. В то же время закономерности, полученные для щелочных бериллов В. А. Франк-Каменецким и Т. А. Соседко, не вызывают сомнений.

Кроме щелочей, необходимо учитывать в берилле и другие примеси (Fe, Mg, Cr, Sc). Бериллы, исследуемые Т. А. Соседко, не содержали заметных количеств Fe, Mg, Cr, Sc, которые могли бы повлиять на изменение параметров ячейки берилла.

Абсолютное большинство примесей в берилле имеет ионный радиус больше замещаемого элемента. Это относится и к примесям Fe^{+2} (0,80), Fe^{+3} (0,67), Mg^{+2} (0,74), Cr^{+3} (0,64), Sc^{+3} (0,83), замещающим

Al^{+3} (0,57). Указанные примеси и нестехиометричные примеси щелочей, щелочных земель (кроме Mg), воды, инертных газов — все они при своем вхождении должны увеличивать объем элементарной ячейки берилла, что и наблюдается судя по табл. 4. Из нее же можно сделать заключение, что в щелочных бериллах, не содержащих заметных примесей Fe, Mg, Cr, Sc, с повышением количества щелочей структура раздвигается вдоль параметра c_0 . В бериллах, содержащих большое количество Sc, Cr, Mg, Fe, структура раздвигается вдоль параметра a_0 , например, в бацитте, изумруде. В берилле, содержащем много щелочей, а также Fe, Mg, структура раздвигается и вдоль параметра c_0 и вдоль параметра a_0 , например в берилле из Аризоны. Этим и объясняется неприменимость операций со средним ионным радиусом, особенно $R_1 + R_2 + R_3$.

Примеси в берилле можно поэтому разделить на две резко противоположные группы по своему влиянию на структуру (табл. 15).

Таблица 15

Влияние примесей на структуру берилла

Группы примесей	Влияние на объем ячейки	Влияние на параметр c_0	Влияние на параметр a_0	Параметр, изменяющийся больше
I. Нестехиометричные примеси: Li, Na, K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba, TR, H ₂ O, He, Ag	Увеличивается	Увеличивается	Уменьшается	c_0
II. Заместители Al: Mg, Fe ⁺³ , Fe ⁺³ , Cr ⁺³ , Sc ⁺³ , Mn ⁺³ , V ⁺³ , Ni, Ti	Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается	a_0

Глава 3

Оптическое строение берилла

Светопреломление берилла

Отрывочные данные по светопреломлению берилла разбросаны в многочисленной геологической литературе.

Углубленные исследования светопреломления берилла начались сравнительно недавно.

Многочисленными измерениями доказано, что берилл однородного строения — оптически одноосный, отрицательный. Но ввиду малого дву- преломления берилла эллиптическая форма индикатрисы близка к шару.

Первое доказательство увеличения удельного веса и светопреломле- ния берилла с увеличением суммы щелочей в нем дано Лакруа (Lacroix, 1911) в связи с исследованием щелочных бериллов Мадагаскара. До этого светопреломление и содержание щелочей в берилле рассматри- вал Форд (Ford, 1910):

Сумма щелочей . . .	0,92	3,29	4,98	6,80
Уд. вес	2,716	2,75	2,79	2,81
<i>Ng</i>	1,5822	1,5860	1,59500	1,5996
<i>Np</i>	1,5760	1,5795	1,58691	1,5811
<i>Ng — Np</i>	0,0062	0,0065	0,00809	0,0085

Из дополнительных его данных также следует, что параллельно со светопреломлением берилла растет его удельный вес и дву- прелом- ление:

<i>Ng</i>	1,5957	1,5977	1,6002
<i>Np</i>	1,5875	1,5894	1,5921
<i>Ng — Np</i>	0,0082	0,0083	0,0081
Уд. вес	2,805	2,80	2,88

А. А. Беусом (1960) впервые построена зависимость между обыкно- венным показателем преломления и дву- преломлением берилла. Пока- зано, что с увеличением среднего показателя преломления его дву- преломление растет.

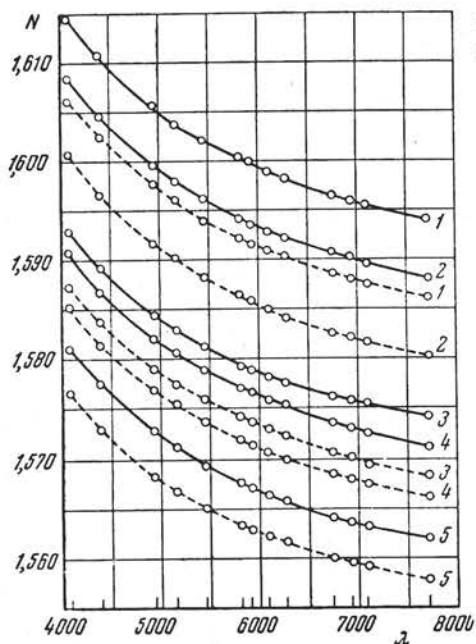
А. Н. Винчелл и Г. Н. Винчелл (1953) наряду с уже несколько уста- ревшими данными по светопреломлению приводят кривые дисперсии светопреломления некоторых типов бериллов (фиг. 7). До этого дис- персия светопреломления берилла изучалась специально Клангом (Klang, 1934) и Бёзе (Böse, 1936).

Выяснено, что дисперсия светопреломления увеличивается с увели- чением среднего показателя преломления и плотности. Окраска берил-

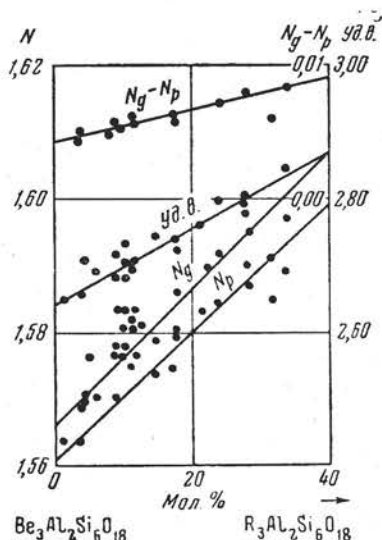
ла из-за незначительной интенсивности не искажает нормальный ход дисперсии.

Графическую зависимость величины светопреломления от удельного веса и химического состава берилла дал Бёзе (Böse, 1936). Квенсел (Quensel, 1937), по собственным и литературным данным, независимо от Бёзе наглядно показал, что с увеличением количества щелочей в бериллах увеличивается их удельный вес, светопреломление и двупреломление. Затем их данные дополнялись и уточнялись (А. Винчелл и Г. Винчелл, 1953; Соседко, 1957; Беус, 1960). В результате мы знаем, что светопреломление берилла и его двупреломление увеличиваются с увеличением количества щелочей в его составе и удельным весом (фиг. 8, 9).

Эта зависимость широко используется при суждении о приблизительном химическом составе щелочных бериллов по их физическим свойствам.



Фиг. 7. Кривые дисперсии светопреломления берилла, по Винчеллу



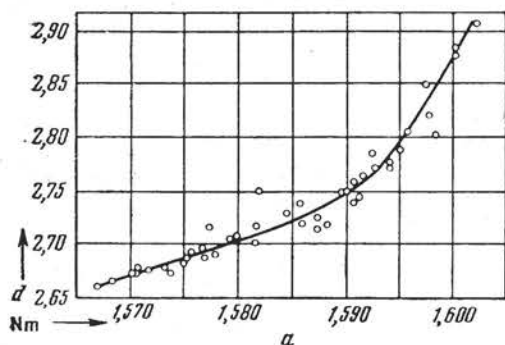
Фиг. 8. Зависимость между светопреломлением, двупреломлением, удельным весом и содержанием щелочей, по Винчеллу

М. Д. Дорфманом (1952) была дана зависимость между величиной светопреломления и генезисом берилла (фиг. 10). Эта зависимость повторяет зависимость между светопреломлением и содержанием щелочей в берилле. Причем М. Д. Дорфман считает, что в бериллах из гипотермальных и грейзеновых месторождений содержание щелочей не превышает 0,5% и поэтому все они обладают пониженным светопреломлением по сравнению с более щелочными бериллами из пегматитов. М. Д. Дорфман рекомендует использовать величину светопреломления берилла для определения генезиса берилла.

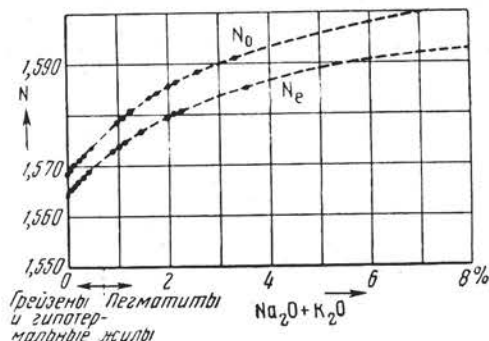
Адамс (Adams, 1953) собрал данные по распространению и оптическим свойствам бериллов из некоторых непегматитовых месторождений. Автор считает, что «величина показателя преломления берилла из различных (непегматитовых) месторождений колеблется в тех же пределах, что и для берилла из гранитных пегматитов». Адамс предполагает, что «жильный берилл из месторождений, содержащих молибден или

олово, имеет низкий или средний показатель преломления по сравнению с бериллом, ассоциирующимся с вольфрамом».

Важное исследование о влиянии изоморфных примесей в берилле на его показатели преломления провел А. И. Шерстюк (1958). На многих образцах берилла и изумруда из различных типов месторождений он проверял положение М. Д. Дорфмана (1952) о возможности определения генезиса берилла по величине его светопреломления и пришел



Фиг. 9. Зависимость между светопреломлением берилла и его удельным весом, по Беусу



Фиг. 10. Зависимость между светопреломлением и генезисом берилла, по Дорфману

к выводу, что «известные в литературе выводы относительно изменения показателя преломления берилла только от содержания щелочей являются неправильными. На величину показателя преломления берилла влияют как щелочи, так и примеси хрома, ванадия, железа и других элементов».

Изученные А. И. Шерстюком бериллы и изумруды при низком содержании щелочей (менее 1%) иногда имели повышенное светопреломление, максимально достигающее 1,587 (N_0) и уд. вес 2,73, но содержали примеси Cr, V, Fe, Ca, Mg, Ni, Mn. А. П. Шерстюк пришел к выводу о невозможности определения генезиса берилла по величине светопреломления, как рекомендует М. Д. Дорфман.

Дир, Хови и Цузмен (Deer, Howie and Zussman, 1962) также построили зависимость светопреломления и удельного веса берилла от содержания щелочей в берилле.

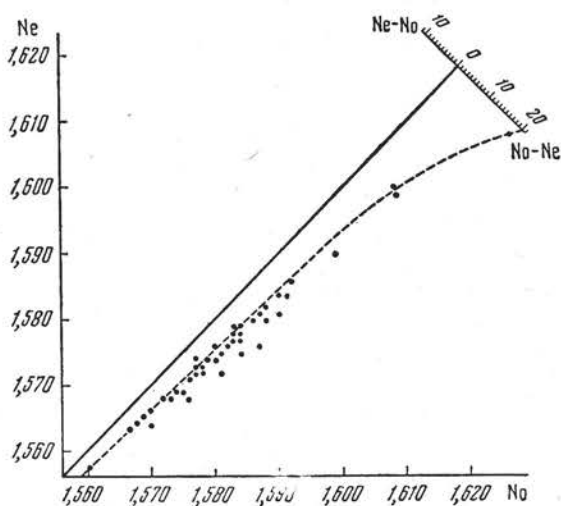
Приведенный обзор позволяет считать, что зависимости между светопреломлением, химическим составом и генезисом берилла не являются окончательно установленными и нуждаются в дополнительном изучении.

Области существования берилла по величине светопреломления

Нами собраны наиболее представительные измерения показателей преломления берилла и учтены собственные измерения, на основании которых построена зависимость между показателями преломления N_0 и N_e . Полученный график (фиг. 11) характеризует область существования берилла по величине светопреломления, а также характер изменения его оптической анизотропии с изменением величины светопреломления.

Мы видим, что пределы существования берилла (включая все разновидности) по величине светопреломления ограничены следующими значениями: N_0 — 1,560—1,626; N_e — 1,557—1,608; $N_0 - N_e$ —

0,003—0,018. С ростом величины светопреломления увеличивается дву-
 преломление, когда показатель преломления N_o увеличивается быст-
 рее, чем N_e .



Фиг. 11. Области существования берилла по величине
 светопреломления и двойного лучепреломления

*О взаимосвязи между светопреломлением, удельным весом,
 химическим составом и генезисом берилла*

Физические, химические свойства берилла и его генезис тесно свя-
 заны. Так, по свойствам берилла из пегматитов можно в большинстве
 случаев установить место берилла в пегматитовом процессе. Большин-
 ство исследователей все изменения свойств берилла из различных ти-
 пов месторождений видят в различном содержании в них щелочей,
 причем считается, что большое содержание щелочей, большой удель-
 ный вес и высокое светопреломление могут быть только у бериллов из
 пегматитовых месторождений (Дорфман, 1952). На другие примеси,
 как факторы повышения удельного веса и светопреломления берилла,
 внимания почти не обращалось. Исключением является работа
 А. И. Шерстюка (1958).

Таблица 16

Свойства бериллов из альбитизированных гранитов и грейзенизированных гранодиоритов

Местонахождение	N_o	N_e	Уд. вес
<i>Альбитизированные граниты</i>			
КНР, материал А. А. Беуса	1,587	1,581	2,7
То же	1,583	1,578	2,69
Сибирь, материал А. А. Беуса	1,577	1,573	2,67
Сибирь, материал Л. А. Агаповой	1,585	1,580	2,7
<i>Грейзенизированные гранодиориты</i>			
Сибирь, материал В. Г. Фекличева и С. И. Лебедевой	1,577	1,574	2,69
То же	1,583	1,579	2,72

Нами было проведено изучение физических и химических свойств бериллов из месторождений, связанных с грейзенизированными и альбитизированными гранитами и гранодиоритами (табл. 16). Сравнение физических и химических свойств бериллов из указанных месторождений со свойствами бериллов из других типов месторождений (табл. 17) показывает, что бериллы из месторождений, связанных с метасоматически измененными гранитоидными породами, являются щелочными.

Таблица 17

Состав и свойства разновидностей берилла

Химический состав	Пегматитовые месторождения		Гидротермально-пневматолитовые месторождения		
	I	II	III	IV	V
SiO ₂	64,86	61,88	65,73	64,95	64,93
BeO	13,29	10,54	13,39	11,93	11,99
Al ₂ O ₃	19,35	17,10	17,23	16,95	17,94
Fe ₂ O ₃	0,62	0,08	1,47	1,27	0,50
FeO	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.
MnO	» »	Следы	» »	Следы	0,01
MgO	0,30	0,22	» »	»	0,39
CaO	0,20	0,44	» »	1,20	0,44
Na ₂ O	0,14	2,50	» »	1,50	1,26
Li ₂ O	Следы	0,60	» »	0,007	Не опр.
K ₂ O	0,25	Не обн.	» »	0,75	0,85
CS ₂ O	Не обн.	4,13	» »	0,024	Не опр.
H ₂ O ⁺	0,32	Не опр.	1,05	Не опр.	0,59
H ₂ O ⁻	Не обн.	0,16	Не обн.	0,15	Не обн.
П. п. п.	0,28	2,22	» »	1,63	1,41
Сумма	99,53	99,92	99,87	100,35	100,31
Аналитик	З. Т. Катаева	Е. Н. Егорова-Фурсенко	М. Е. Славский	З. Т. Катаева	И. С. Разина
No	1,572	1,592	1,573	1,577	1,587
Ne	1,568	1,586	1,568	1,574	1,581
Уд. вес	2,67	2,78	2,67*	2,69	2,7

* Наши определения.

I — роль щелочей ничтожна; из занорыша пегматита, Европейская часть СССР; II — роль щелочей повышена; из пегматита, Европейская часть СССР (Соседко, 1957); III — роль щелочей ничтожна; из кварц-топазовых грейзенов, Сибирь (Суцинский, 1928); IV — роль щелочей повышена; из грейзенизированных гранитов, Сибирь; V — роль щелочей повышена; из альбитизированных гранитов, КНР.

Материалы табл. 17 свидетельствуют о том, что физические свойства берилла зависят не столько от принадлежности к пегматитовым или эпитеpmальным образованиям, сколько от химического состава, главным образом от количественного содержания в них разных щелочей.

Сопоставление анализов бериллов из различных типов месторождений по литературным данным показывает, что содержание щелочей в бериллах отражает роль разных щелочных металлов в последовательном процессе минералообразования. Например, калий присутствует в составе щелочных бериллов в незначительном количестве, но в бесщелочных и слабощелочных бериллах из неальбитизированных гранитных пегматитов калий обычно преобладает над другими щелочами и даже натрием. Объясняется это тем, что в незамещенных гранитных пегматитах главная масса щелочей представлена калием. Совершенно бесщелочные бериллы характерны для того этапа грейзенового процес-

са, во время которого происходит кислотное выщелачивание пород (вынос щелочей) вплоть до образования пород, в которых щелочи полностью отсутствуют (например, кварц-топазовые с бериллом грейзены). Бериллы со средним и высоким содержанием щелочей образуются только в период замещения пород, когда привносится большое количество щелочей, главным образом натрия и лития. В этом случае щелочной берилл образуется в различных типах месторождений: в альбитизированных пегматитах, альбитизированных гранитах, в грейзеновых месторождениях (в участках отложений альбита) (см. главу 2).

Известно, что с увеличением общего количества щелочей в бериллах увеличивается содержание редких щелочей. Это явление закономерно отражает изменение количества и роли разных щелочей в ходе природного процесса, что находит яркое подтверждение в пегматитовом, а также грейзеновом процессе (Ферсман, 1950; Беус, 1960, 1961, 1959; Беус и Ситнин, 1959, 1961). Выявляется следующий порядок изменения роли щелочных элементов в составе берилла, который идет параллельно с увеличением общего количества щелочей: K, Na, Li, Cs, Rb. Помимо щелочей, и другие примеси (Fe, Mg, Ca, Se, Cr, H₂O и др.) нередко в значительных количествах входят в состав берилла. Так, в бериллах, образующихся в метасоматически измененных змеевиках и основных породах, обычно высокое содержание Mg и Ca. В бериллах из высокотемпературных гидротермальных и грейзеновых месторождений, находящихся в ассоциации с гематитом, вольфрамитом, арсенопиритом, характерно высокое содержание Fe. Материал табл. 6

Таблица 18

Важнейшие компоненты в составе берилла и их физические характеристики

Ион	Ионные рефракции по С. С. Вацанову (1959)	Атомные веса по В. И. Спицыну (1957)	Ион	Ионные рефракции по С. С. Вацанову (1959)	Атомные веса по В. И. Спицыну (1957)
Fe ⁺³	1,13	55,85	Cr ⁺³	0,21	52,01
Fe ⁺²	1,14		V ⁺³	0,31	50,95
Ni ⁺²	1,08	58,71	Sr ⁺²	2,56	87,63
Mn ⁺²	0,16	54,93	Ba ⁺²	4,67	137,36
Mg ⁺²	0,26	24,32	Se ⁺³	0,72	44,96
Ca ⁺²	1,39	40,08	B ⁺³	0,006	10,82
Na ⁺¹	0,47	22,997	P ⁺⁵	0,05	30,975
K ⁺¹	2,24	39,100	H ⁺¹	0,00	1,008
Li ⁺¹	0,08	6,940	Be ⁺²	0,03	9,013
Cs ⁺¹	6,42	132,91	Al ⁺³	0,14	26,98
Rb ⁺¹	3,75	85,48	Si ⁺⁴	0,08	28,09
Ti ⁺⁴	0,46	47,90			

и 18 показывает, что физические свойства (светопреломление и удельный вес) берилла должны зависеть не только от содержания щелочей, но и от относительного количества других важнейших примесей. Данные табл. 19 подтверждают это.

Полученные данные позволяют считать, что зависимость между физическими свойствами (светопреломлением и удельным весом) и химическим составом берилла не является столь простой, как это вывели Бёзе (Böse, 1936) и Квенсел (Quensel, 1937), учитывающие только сумму щелочей. Эта зависимость справедлива для наиболее хорошо изученных щелочных бериллов из гранитных пегматитов, содержащих мало Fe, Mg и Ca. В бериллах из других типов месторождений необходимо учитывать и другие примеси. Требуется уточнения и схема зависимости светопреломления берилла от генезиса, предложенная М. Д. Дорфманом (1952), который считал, что в бериллах из непегматитовых месторождений количество щелочей не может превышать 0,5% и что поэтому они всегда обладают низким светопреломлением.

Физические свойства бериллов с малым содержанием щелочей и высоким содержанием других примесей

Компоненты	Изумруд (Jakob, 1938)	Ростерит (Simpson, 1948)	Аквамарин (Paulose, 1957)	Компоненты	Изумруд (Jakob, 1938)	Ростерит (Simpson, 1948)	Аквамарин (Paulose, 1957)
R ₂ O	0,23	3,01	2,61	FeO	0,41	Следы	0,70
MgO	—	1,48	3,37	No	1,591	1,588	—
CaO	0,07	3,98	3,31	Ne	1,584	1,582	—
Fe ₂ O ₃	1,73	1,39	—	Уд. вес	—	2,79	2,78

В результате изучения физических свойств бериллов из разных типов месторождений и учета литературных данных получилась следующая схема колебаний физических свойств берилла из разных типов месторождений (табл. 20).

Таблица 20

Колебания физических свойств берилла в различных типах месторождений

Месторождения, тип берилла	No	Ne	d
<i>Месторождения в гранитных пегматитах</i>			
Бесщелочные и слабощелочные бериллы из незамещенных пегматитов	1,560—1,578	1,557—1,573	2,65—2,7
Щелочные натровые бериллы из альбитизированных пегматитов	1,574—1,584	1,569—1,578	2,67—2,74
Сильнощелочные бериллы с редкими щелочами из пегматитов	1,580—1,602	1,574—1,595	2,73—2,9
Бериллы с большим содержанием щелочей и щелочных земель и железа из пегматитов	1,588—1,608	1,582—1,599	2,79—2,92
<i>Месторождения, связанные с измененными ультраосновными и карбонатными породами</i>			
Магнезиально-кальциевые бериллы и изумруды из жильных образований в измененных змеевиках	1,576—1,589	1,571—1,585	2,68—2,79
Изумруды и магнезиальные бериллы из метасоматических пород в змеевиках	1,575—1,592	1,571—1,589	2,69—2,78
Изумруды из измененных карбонатных пород	1,568—1,578	1,562—1,573	2,71—2,72
<i>Грейзеновые и гидротермальные месторождения в гранитных и других алюмосиликатных породах</i>			
Бесщелочные железистые бериллы (гелиодоры, аквамарины) из высокотемпературных гидротермальных и грейзеновых месторождений в алюмосиликатных породах	1,570—1,591	1,566—1,584	2,66—2,7
Щелочные натровые и кальциево-натровые бериллы из грейзенизированных и альбитизированных гранитных пород и грейзенов, связанных с отложением альбита	1,577—1,587	1,573—1,581	2,67—2,7
Скандиевый берилл (бацит) из высокотемпературных альпийских жил в гранитах	1,626	1,608	2,80

Изложенный материал позволяет сделать следующие выводы:

1. Только по физическим свойствам (удельному весу и светопреломлению) нельзя однозначно определить генезис берилла, его принадлежность к определенному типу месторождений.

2. Химический состав берилла, в особенности состав примесей щелочных металлов, а также Ca, Mg, Fe и др., в большей мере, чем физические свойства, отражает условия образования берилла.

3. При определении генезиса берилла необходимо изучение физических и химических свойств берилла в их совокупности с учетом известных геологических данных.

О характере связи между светопреломлением берилла и содержанием в нем определенных щелочей

Выше указывалось, что светопреломление берилла возрастает с увеличением в его составе суммы щелочей. Но было также показано, что при этом необходимо учитывать и другие примеси (Ca, Mg, Fe и др.). Кроме того, предполагается, что разные щелочи по-разному влияют на светопреломление берилла. Представлялось интересным и практически важным выяснить характер этого влияния. С этой целью были подобраны бериллы с полными химическими анализами и измеренными показателями преломления. При этом отбирались те анализы, где существенными примесями являлись только щелочи (Li_2O , Na_2O , K_2O и Cs_2O), а остальные примеси содержались в ничтожных количествах. Главным образом отбирались бериллы из гранитных пегматитов.

Таблица 21

Содержание щелочей (в вес. % окисла) в бериллах и их светопреломление

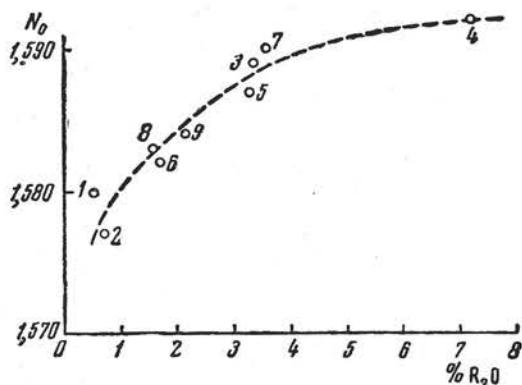
Компоненты	Данные автора			Соседко, 1958		Norrish, 1950	Kerr, 1946	Quensel, 1937	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Li_2O	0,043	0,064	0,688	0,60	1,23	0,52	1,00	0,36	0,08
Na_2O	0,351	0,50	1,336	2,50	1,39	0,94	0,01	1,09	1,27
K_2O	0,18	0,096	0,216			0,16	0,40	0,16	0,39
Cs_2O	0,042	0,064	1,12	4,13	0,67	0,08	2,18	0,26	0,42
Σ	0,51	0,72	3,37	7,23	3,29	1,70	3,59	1,57	2,16
<i>No</i>	1,580	1,577	1,589	1,592	1,587	1,582	1,590	1,583	1,584
<i>Ne</i>	1,575	1,573	1,582	1,586	1,581	1,576	1,581	1,577	1,577

По материалам табл. 21 построена зависимость между суммой щелочей и показателем преломления *No* (фиг. 12). Видно, что между указанными величинами существует относительно хорошая зависимость, однако точки все же разбросаны около кривой. Вероятнее всего предположить, что этот разброс является следствием неодинакового соотношения между весовыми процентами определенных щелочей при одинаковой их сумме.

Атомные рефракции щелочных элементов разные и возрастают с увеличением атомного веса (табл. 22).

Если учитывать щелочные атомы не в весовых процентах, а в абсолютных количествах, то согласно табл. 22 можно считать, что светопреломление вещества увеличится на одинаковую долю, если в него войдет одна часть атомов Cs или 13 частей атомов Na. Относительные количества атомов элементов находятся делением содержания элемен-

тов в весовых процентах на соответствующий атомный вес. Отсюда ясно, что, имея дело с весовыми процентами содержаний элементов в минерале, для нахождения суммарной рефракции нужно множить весовой процент содержания элемента в минерале на удельную рефракцию, которая является частным от деления атомной рефракции на



Фиг. 12. Зависимость между суммой щелочей (R_2O в %) и показателем преломления N_0 берилла

атомный вес (атомная рефракция является произведением удельной рефракции на атомный вес).

В табл. 22 видно, что удельные рефракции значительно менее разнятся между собой, чем атомные рефракции. Сопоставляя светопреломление с суммарными весовыми процентами щелочей, а не с абсолютными

Таблица 22
Оптико-весовые свойства элементов

Элемент	Атомный вес, $A_э$	Атомная рефракция, RA	Удельная рефракция $R = RA/A_э$
Li	6,94	0,08	0,01154
Na	22,997	0,47	0,02043
K	39,1	2,24	0,05728
Cs	132,91	6,42	0,0483

ми количествами щелочных атомов, мы переходим от атомных рефракций к удельным рефракциям. Поэтому в эмпирической зависимости светопреломления берилла от суммы щелочей влияние соотношения разных щелочей на светопреломление не сказывается резко.

Весовые проценты содержаний окислов щелочей в берилле из табл. 21 были

пересчитаны на весовые проценты щелочных элементов, а полученные значения были помножены на соответствующую удельную рефракцию щелочного элемента (табл. 23). Для каждого образца вычислялась суммарная рефракция.

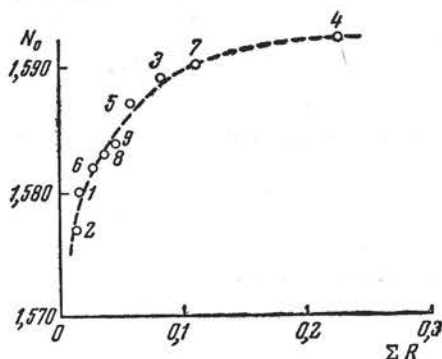
Зависимость между полученными суммарными рефракциями и показателями преломления N_0 (фиг. 13) получилась более удовлетворительной (все точки легли на одну кривую), чем зависимость между содержанием щелочного элемента в весовых процентах и показателем преломления N_0 , однако характер ее остается тот же.

Зависимость между суммарной рефракцией щелочей и показателем преломления N_0 , данная на фиг. 13, может быть использована для проверки точности химических анализов щелочей в бериллах.

Определение процентного содержания щелочей в щелочных бериллах по измеренному показателю преломления N_0 можно вести по графику, изображенному на фиг. 12. Небольшой разброс точек около этой

кривой объясняется маленькой разницей значения удельных рефракций щелочных элементов. Крайние значения (для Li и K) разнятся всего в 5 раз, в то время как крайние значения атомных рефракций (для Li и Cs) разнятся в 80 раз.

Проведенные расчеты говорят о том, что эмпирическая зависимость между процентным содержанием щелочей в берилле и его светопреломлением хотя и является грубой, но с известной точностью может



Фиг. 13. Зависимость между суммарной рефракцией ΣR и показателем преломления N_0 щелочного берилла

быть использована для практических целей — определения суммы примесей щелочей по измеренному показателю преломления, если предполагается, что в берилле нет других существенных примесей. Ясно также, что не должно существовать зависимости между суммой щелочных атомов, выраженной не в весовых процентах, и светопреломлением берилла, так как при этой зависимости разброс точек около кривой должен увеличиться в 16 раз (80 : 5) по сравнению с предыдущей зависимостью.

Рефрактометрическое определение координации элементов-примесей в структуре берилла

Для обоснования определенной формы вхождения щелочных атомов в структуру берилла ниже приводится расчет рефракций берилла. Исходя из того, что С. С. Бацановым (1959) показана возможность определения по рефракциям неорганических соединений типа координации в них атомов Al и других атомов, нами предпринята попытка получить новые данные в пользу той или иной гипотезы о характере вхождения щелочей в структуру берилла путем сопоставления теоретических и опытных рефракций берилла.

Для расчетов были выбраны три химических анализа берилла с данными по их физическим свойствам из работы Т. А. Соседко (1957) (табл. 24).

Химические анализы были пересчитаны на отношения окислов. В основу пересчета была положена общая структурная формула берилла по А. И. Гинзбургу (1955):



которую можно представить в виде окислов:

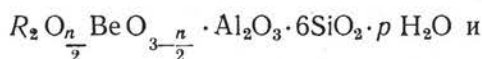


Таблица 23

Содержание щелочных элементов (в вес. %) в бериллах и рассчитанные рефракции щелочей в бериллах *

	1		2		3		4		5	
	A	R	A	R	A	R	A	R	A	R
Li	0,02	0,0002308	0,03	0,0003462	0,32	0,0036928	0,28	0,0032312	0,57	
Na	0,26	0,0053118	0,37	0,0075591	0,99	0,0202257	1,85	0,0377955	1,03	
K	0,15	0,0085920	0,08	0,0045824	0,18	0,0103104				
Cs	0,04	0,001932	0,06	0,002898	1,06	0,051198	3,88	0,187404	0,64	
ΣR		0,0160666		0,0153857		0,0854269		0,2284307		

	6		7		8		9	
	A	R	A	R	A	R	A	R
Li	0,065778	0,24	0,46	0,0053084	0,17	0,0019618	0,04	0,0004616
Na	0,0210429	0,70	0,01	0,0001154	0,81	0,0165483	0,94	0,0192042
K		0,13	0,33	0,0189024	0,13	0,0074464	0,32	0,0183296
Cs	0,030912	0,08	2,05	0,099015	0,24	0,011592	0,39	0,018837
ΣR		0,0585327		0,1133412		0,0376485		0,0568324

* A — содержание элемента в вес. %.

R — рассчитанная рефракция щелочей в бериллах = $A \frac{RA}{R_0}$, где RA — атомная рефракция элемента, A₀ — атомный вес элемента.

Состав и свойства трех щелочных бериллов по Т. А. Соседко (1957)

Оксиды	Вес. %	Колич. * окисла	Вес. %	Колич. * окисла	Вес. %	Колич. * окисла
SiO ₂	65,32	6,00	64,17	6,00	61,88	6,00
TiO ₂	0,01	0,001	0,01	0,001	0,01	0,001
Al ₂ O ₃	17,77	0,966	17,42	0,960	17,10	0,987
Fe ₂ O ₃	0,13	0,0005	0,13	0,0005	0,08	0,0005
BeO	12,60	2,782	11,82	2,653	10,54	2,450
CaO	0,26	0,028	0,44	0,045	0,44	0,047
MgO	0,25	0,033	0,21	0,028	0,22	0,029
Li ₂ O	0,30	0,050	1,23	0,219	0,60	0,111
Cs ₂ O	0,27	0,006	0,67	0,011	4,13	0,087
Na ₂ O	1,27	0,110	1,39	0,130	2,50	0,233
П.п.п	1,76	0,53	1,88	0,57	2,26	0,68
H ₂ O	0,08		0,60		0,16	
Сумма	100,02		99,96		99,92	
Уд. вес	2,72		2,75		2,78	
No	1,580		1,587		1,592	
Ne	1,574		1,581		1,586	

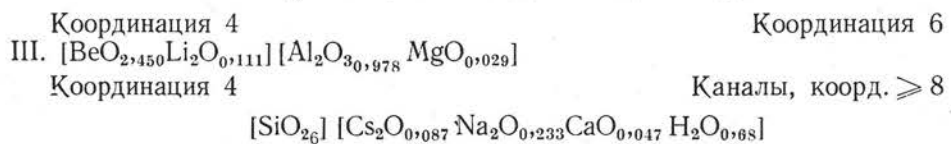
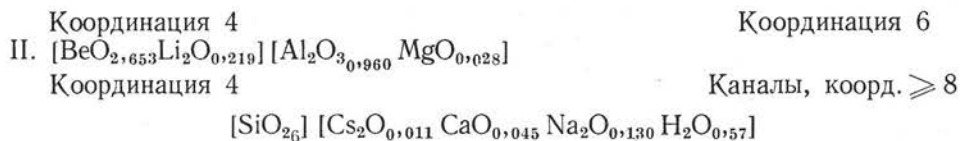
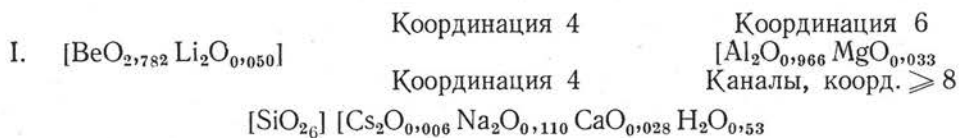
* Молекулярное количество окисла, пересчитанное на 6SiO₂.

пересчет велся на 6SiO₂. Потери при прокаливании считались как H₂O⁺, поскольку H₂O⁺ не анализировалась прямым методом.

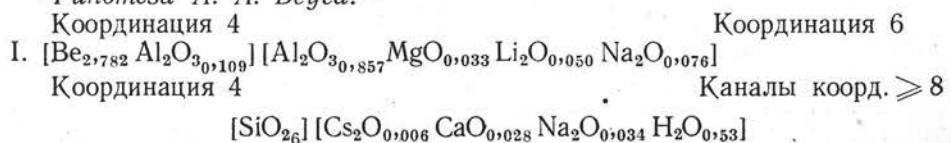
Полученные количества окислов распределены по определенным местам в структуре берилла согласно гипотезам Н. В. Белова, А. А. Беуса и нашим предположениям (см. главу 2). Предположения В. А. Франк-Каменецкого и Т. А. Соседко, судя по последней работе В. А. Франк-Каменецкого (1959), мало отличаются от гипотезы Н. В. Белова.

Данные табл. 24 позволяют записать химические формулы берилла в окислах следующим образом:

Гипотеза Н. В. Белова:



Гипотеза А. А. Беуса.



Координация 4 Координация 6
 II. $[\text{BeO}_{2,653} \text{Al}_2\text{O}_{3,173}] [\text{Al}_2\text{O}_{3,786} \text{MgO}_{0,028} \text{Li}_2\text{O}_{0,199}]$
 Координация 4 Каналы, коор. ≥ 8
 $[\text{SiO}_{26}] [\text{Cs}_2\text{O}_{0,011} \text{CaO}_{0,045} \text{Li}_2\text{O}_{0,020} \text{Na}_2\text{O}_{0,130} \text{H}_2\text{O}_{0,57}]$

Координация 4 Координация 6
 III. $[\text{BeO}_{2,450} \text{Al}_2\text{O}_{3,270}] [\text{Al}_2\text{O}_{3,703} \text{MgO}_{0,029} \text{Li}_2\text{O}_{0,111} \text{Na}_2\text{O}_{0,171}]$
 Координация 4 Каналы, коор. ≥ 8
 $[\text{SiO}_{26}] [\text{Cs}_2\text{O}_{0,087} \text{CaO}_{0,047} \text{Na}_2\text{O}_{0,062} \text{H}_2\text{O}_{0,68}]$

Наша гипотеза

Координация 4 Координация 6 Координация 4
 I. $[\text{BeO}_{2,782}] [\text{Al}_2\text{O}_{3,966} \text{MgO}_{0,033}] [\text{SiO}_{26}]$
 Координация ≥ 8
 $[\text{Li}_2\text{O}_{0,050} \text{Na}_2\text{O}_{0,110} \text{Cs}_2\text{O}_{0,006} \text{CaO}_{0,028} \text{H}_2\text{O}_{0,53}]$

Координация 4 Координация 6 Координация 4
 II. $[\text{BeO}_{2,653}] [\text{Al}_2\text{O}_{3,960} \text{MgO}_{0,23}] [\text{SiO}_{26}]$
 Координация ≥ 8
 $[\text{Li}_2\text{O}_{0,219} \text{Na}_2\text{O}_{0,130} \text{Cs}_2\text{O}_{0,011} \text{CaO}_{0,045} \text{H}_2\text{O}_{0,57}]$

Координация 4 Координация 6 Координация 4
 III. $[\text{BeO}_{2,450}] [\text{Al}_2\text{O}_{3,978} \text{MgO}_{0,029}] [\text{SiO}_{26}]$
 Координация ≥ 8
 $[\text{Li}_2\text{O}_{0,111} \text{Na}_2\text{O}_{0,233} \text{Cs}_2\text{O}_{0,087} \text{CaO}_{0,047} \text{H}_2\text{O}_{0,68}]$.

Исходя из полученных формул, можно получить теоретические молекулярные рефракции бериллов, сложив пропорционально отношению окислов в формулах берилла теоретические рефракции окислов, входящих в состав берилла, учитывая координацию атомов в структуре берилла.

Для определения теоретических молекулярных рефракций берилла мы пользовались рефракциями окислов в силикатах, взятыми из работы С. С. Бацанова (1959). При уменьшении координационного числа атома ковалентность связи увеличивается во столько раз, во сколько координационное число больше валентности данного атома. Это правило Паулинга подтверждает С. С. Бацанов. По известным рефракциям окислов в силикатах: Na_2O для координации Na—8 и Li_2O для координации Li—6, согласно вышесказанному, пользуясь зависимостью между изменением рефракции и изменением связи для атомов типа благородных газов, данной С. С. Бацановым (1959), определены рефракции окисла Na_2O для координации Na—6 и Li_2O для координации Li—4. В расчетах мы исходили из того, что рефракции окислов в силикатах Na_2O для координации Na—8 и Li_2O для координации Li—6 отвечают ионности связи приблизительно в 100%, так как при сравнении рефракций окислов Na_2O и Li_2O , полученных путем сложения атомных и ионных рефракций по таблицам, данным С. С. Бацановым (1959), получается, что рефракции окислов в силикатах: Na_2O для координации Na—8 и Li_2O для координации Li—6 близки и даже меньше рефракций, полученных путем сложения ионных рефракций Na^{+1} , Li^{+1} и O^{-2} . Рефракция окисла Cs_2O рассчитана путем сложения ионных рефракций, так как предполагается, что Cs, занимая место в структуре берилла в каналах, должен иметь максимальную координацию и, следовательно, максимальную ионность связи, близкую к 100%. Предполагается также, что рефракции окисла Na_2O для координации Na

больше 8, Li₂O для координации Li больше 6 и CaO для координации Ca больше 8 не могут существенно уменьшиться против соответствующих величин для координации 8 для Na, 6 для Li и 8 для Ca, так как последние значения рефракций отвечают уже сильно ионной связи. Поскольку вода в берилле, согласно всем исследователям, располагается в каналах и имеет цеолитный характер, взята была рефракция свободной воды.

Таким образом, получаем значения рефракций окислов, отвечающих определенным местам катионов в структуре берилла (табл. 25).

Используя данные значения рефракций окислов и формулы берилла, согласно трем гипотезам, рассчитываем теоретические молекулярные рефракции берилла (табл. 26). Опытные рефракции берилла рассчитываются по формуле Лоренца:

$$R_m = \frac{n_{\infty}^2 - 1}{n_{\infty}^2 + 2} \cdot \frac{M}{d},$$

где n_{∞} — показатель преломления, рассчитанный для длины волны λ_{∞} . Для расчета брались средние показатели преломления берилла $\frac{N_0 + N_e}{2}$, причем показатели преломления, определенные для длины

Таблица 25

Рефракции окислов в силикате

Окислы	Координация катиона	Рефракция	Окислы	Координация катиона	Рефракция
BeO	4	3,23	Li ₂ O	6 и > 6	5,31
Al ₂ O ₃	4	12,57	Na ₂ O	6	7,53
SiO ₂	6	11,11	Cs ₂ O	8 и > 8	6,85
TiO ₂	4	7,18	Cs ₂ O	8 и > 8	19,47
MgO	6	4,54	CaO	8 и > 8	7,37
Li ₂ O	4	6,37	H ₂ O	Свободная	3,66

волны $\lambda = 590$ мμ, пересчитывались согласно кривым дисперсии показателей преломления берилла (Винчелл и Винчелл, 1953) для длины волны λ_{∞} . Удельный вес использовался опытный. Значения опытных рефракций даны в табл. 26.

Сопоставление теоретических и опытных рефракций берилла показывает, что наиболее высокая теоретическая рефракция отвечает гипотезе А. А. Беуса, наиболее низкая — нашей гипотезе. Расхождение между теоретической и опытной рефракциями для нашей гипотезы получилось наименьшее.

Таблица 26

Молекулярные рефракции берилла

Образцы	Показатель преломления n_{∞}	Уд. вес d	Молекулярный вес, M	Теоретические расчетные рефракции						Опытные рефракции
				гипотеза Н. Б. Белова	Δ	гипотеза А. А. Беуса	Δ	наша гипотеза	Δ	
I	1,569	2,72	550,983	66,15	-0,07	66,43	+0,21	66,22	$\pm 0,0$	66,22
II	1,575	2,75	556,985	67,36	+0,74	67,36	+0,74	67,12	+0,50	66,62
III	1,579	2,78	580,146	68,81	-0,27	69,24	+1,16	68,68	-0,40	69,08
				$\Delta_{\text{ср}} + 0,133$		$\Delta_{\text{ср}} + 0,7003$		$\Delta_{\text{ср}} + 0,033$		

Δ —расхождение между опытной и расчетной рефракцией.

Окраска берилла

Окраска берилла привлекала к себе многих, начиная с древних народов, у которых окрашенные бериллы, в особенности изумруды (смаррагды), служили в качестве драгоценных камней и талисманов. Окраска служила наиболее простым и ярким физическим признаком для отличия разновидностей берилла.

Согласно главному справочнику по минералогии и оптической минералогии, большинство разновидностей берилла было выделено по цвету. К ним относятся:

1. Изумруд — ярко-зеленый.
2. Аквамарин — голубой до синего.
3. Гелиодор — желтый, оранжевый.
4. Давитсонит — золотистый.
5. Гошенит — молочно-белый.

Кроме этого, для берилла характерны следующие окраски: розовая, зеленая, коричневая, янтарная. Отмечались черная, кобальтово-синяя, красная.

Цвет берилла меняется в зависимости от генезиса и химического состава. Так, А. Е. Ферсман (1940), перечисляя типоморфные признаки берилла в гранитных пегматитах, указывает на цвет как на характернейшее свойство бериллов из разных фаз пегматитов.

Крукшенк (Crockshank, 1948) для бериллов пегматитов Раджастана отмечает непостоянство цвета. Наиболее обычны зеленые и голубые цвета. Редкие оранжевые и янтарные цвета обусловлены присутствием редкоземельных металлов. Черный берилл окрашен окислами марганца. Встречаются розовые, коричневые, красно-коричневые, бесцветные бериллы.

Камерон, Рау и Вэйс (Cameron, Rowe, Weis, 1953) для пегматитов района Мидлтаун (Коннектикут) отмечают изменение цвета берилла в разных пегматитах и даже внутри одного и того же тела. Наблюдаются следующие цвета:

Месторождение	Цвет
Бордо Каро	Светло-зеленый
Готта-Уолден	»
Кейз	»
Восточный Селден	Бледно-зеленый до белого
Слокум	Золотистый
Стрикленд-Крампер	Голубой, золотистый, розовый

Авторы предполагают, что изменение цвета бериллов соответствует изменению содержания в них щелочей.

На основании большого количества фактов из научной литературы и собственных наблюдений бериллов в музейных коллекциях можно твердо считать, что для бесщелочных наиболее характерны зеленые, голубые, желтые, коричневые окраски, порой весьма густые, для щелочных бериллов характерны более светлые, нежные окраски: молочно-белые, розовые, светло-желтые, яблочно-зеленые.

Природа окраски берилла изучалась многими исследователями. Уже на основании только одних химических анализов примесей в бериллах были правильно определены многие хромофоры, которые вызывают окраску берилла, что впоследствии подтвердилось при детальном изучении светопоглощения.

Дольгер (Doelter, 1915) в монографии о цветных минералах отмечает, что цвета бериллов могут быть серыми, белыми, голубыми, золотистыми, изумрудными, розовыми. Он отдельно разбирает цвета изумруда, аквамарина и золотистого берилла. Пишет, что окраска изумруда вызвана хромом, бурый цвет берилла вызван примесью Fe_2O_3 .

Кланг (Klang, 1935) желтый и бурый цвет берилла объяснял примесями Fe_2O_3 , синий — комплексом $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Б. О. Гаврусевич (1946) считает главными хромофорами в берилле: Cr , Fe^{+3} , Fe^{+2} , Ti , Ni . Изумруды, согласно ему, окрашены Cr , аквамарин окрашен Ti , но также Ni и Fe .

А. Винчелл и Г. Винчелл (1953) отмечают, что бериллы могут иметь зеленый, синий, желтый, белый, розовый цвет. Розовый берилл обычно содержит большое количество щелочей, особенно цезия.

Г. Ф. Виноградов (1956) различные окраски бериллов объяснял примесями Na_2O , K_2O , Li_2O , Cs_2O , H_2O , а также FeO , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , NiO , Ti_2O_3 . Необычный коричневый цвет и астеризм драгоценного берилла из Бразилии, по Ротленду (Rutland, 1956), обусловлены наличием многочисленных включений рутила и, вероятно, мусковита. Дейк (Dake, 1954) считает, что необычная дымчатая окраска некоторых бериллов из пегматитов Мадагаскара обусловлена воздействием на них в течение длительного геологического времени радиоактивного излучения минералов урана и тория, распространенных в тех же пегматитах.

Примеси хрома в повышенных количествах уже давно наблюдались в изумрудах. Хаутфейл и Перрей (Hautefeuille und Perrey, 1888) выяснили связь голубовато-зеленой окраски изумруда с содержанием хрома. Е. Ф. Гросс (1925) произвел спектрографическое исследование изумрудов, в результате чего сделал вывод о том, что окраска изумрудов объясняется наличием в них хрома.

Н. Дилакторский (1931) считает, что все зелено-голубые оттенки окраски берилла обусловлены примесью хрома. Он определил количество хрома в трех образцах и пишет, что интенсивность зеленой окраски находится в прямой зависимости от содержания хрома:

В зеленых образцах	{	I	0,050%	Cr_2O_3
		II	0,042%	Cr_2O_3
В голубом образце		II	0,008%	Cr_2O_3

Автор ссылается на анализы бериллов у Дольтера как на доказательство отсутствия зависимости между окраской и количеством железа в бериллах.

Розовую окраску берилла связывали с содержанием Li и Cs В. И. Вернадский (Vernadsky, 1909), Дюпарк и др. (Duparc, Wunder und Sabot, 1911), А. Е. Ферсман (1940). Розовый цвет берилла возникает благодаря высокому содержанию щелочей и особенно лития, как считает Хейтон (Hauton, 1947).

С. А. Боровик (1943) провел определение количества скандия в бериллах. Автор делает вывод, что содержание скандия связано с их окраской. В неокрашенных бериллах не обнаруживается присутствия скандия, а в аквамаринах почти всегда обнаруживаются значительные концентрации его (0,02—0,03%). С. А. Боровик считает, что связь скандия с окраской, по-видимому, вторичного характера. Скандий усиливает окраску, вызванную другими элементами, например хромом в изумрудах.

Дир, Хови и Цузмен (Deer, Howie and Zussman, 1962) считают, что желтый цвет гелиодора может быть обусловлен следами урана.

Мы видим, что суждения различных авторов о природе окраски бериллов на основании только одних химических данных противоречивы. Необходимы были специальные оптические исследования окраски, которые стали возможны благодаря развитию оптических методов.

Работы по измерению плеохроизма у бериллов начались вскоре после того, как в микроскопах стали употребляться устройства для поляризации света.

Гайдингер (Geidinger, 1845) при помощи изобретенной им дихроскопической лупы исследовал плеохроизм бериллов и изумрудов. Для берилла оливково-зеленого цвета он нашел, что необыкновенный луч поглощается менее, чем обыкновенный.

Беер (Beer, 1851) отмечает отсутствие плеохроизма в желтых и синевато-зеленых бериллах. Грайлих (Greilich, 1858) в трех образцах черных бериллов обнаружил более сильное поглощение необыкновенного луча, чем обыкновенного. Согласно Андерсону (Anderson, 1935), у синтетических изумрудов плеохроизм от желто-зеленого до голубовато-зеленого.

Согласно Шлозмахеру и Клангу (Schlosmacher and Klang, 1935), ярко-синий берилл из Минас-Жерайса (Бразилия) на свету выцветал и становился бледно-желтым. Свежий берилл имел плеохроизм: *No* — жемчужно-синий, *Ne* — бесцветный. Согласно Роблингу и Тромаву (Roebbling and Trompav, 1935), берилл содержал всего 0,03% Fe_2O_3 , но также следы меди. Помимо этого он обладал высокой щелочностью и содержал 0,39% B_2O_3 . У ярко-голубого бациты наблюдался плеохроизм (Artini, 1915): *Ne* — интенсивный небесно-голубой, *No* — очень светлый зеленовато-желтый.

С. В. Грум-Гржимайло (1940) в работе, посвященной методике изучения окраски кристаллов, вызванной хромом, приводит данные об измерении плеохроизма у изумрудов. Плеохроизм изумрудов обусловлен тем, что максимумы поглощения сдвинуты и обладают разной высотой.

Согласно А. Винчеллу и Г. Винчеллу (1953), плеохроизм у бериллов наблюдается только в толстых пластинках (табл. 27).

Таблица 27

Плеохроизм бериллов, по Винчеллу

Направление колебаний света*	Минерал			
	Изумруд	Синий берилл	Желтый берилл	Розовый берилл
<i>Ne</i>	Цвет морской волны	Синий	Красновато-желтый	Бледно-розовый
<i>No</i>	Желтовато-зеленый	Зеленовато-синий до бесцветного	Золотисто-желтый	Бесцветный

* Формула абсорбции в некоторых случаях $Ne < No$.

Детальное изучение светопоглощения бериллов началось еще в прошлом веке.

Меррит (Merrill, 1895) измерил светопоглощение берилла в инфракрасной области. Он нашел, что кривые светопоглощения обыкновенной и необыкновенной волны независимы по своей форме.

Кёнигсбергер (Koenigsberger, 1897) изучал в ультрафиолетовом и инфракрасном свете берилл и в противоположность Мерриту нашел, что кривые светопоглощения обыкновенных и необыкновенных лучей в нем имеют сходный характер.

Кланг (Klang, 1934) детально исследовал природу окраски голубых, зеленых и желтых бериллов из разных мест. Он пришел к выводу, что в окрашивании этих бериллов участвуют ионы Fe^{+2} и Fe^{+3} . Кольбе (Kolbe, 1935) связывал максимум в спектре поглощения изумрудов с хромом. Андерсон (Anderson, 1950) измерял светопоглощение естественных и искусственных изумрудов. Губелин (Gubelin, 1951) изучал оптические свойства изумрудов Индии, в том числе их светопоглощение.

С. В. Грум-Гржимайло (1958) в статье «Окраска самоцветов» подробно разбирает окраски самоцветов, окрашенных изоморфными при-

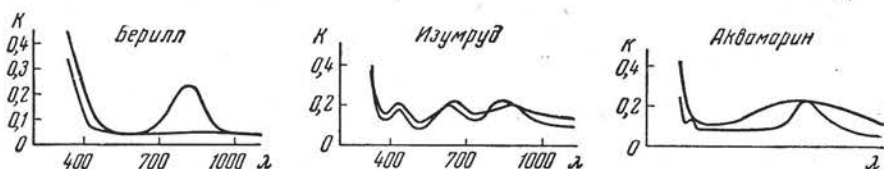
месями Fe^{+2} , Fe^{+3} , Cr , в том числе окраски бериллов. Окраска желтых и зелено-желтых бериллов для обыкновенного луча вызывается Fe^{+2} . Для необыкновенного луча окраска вызывается Fe^{+3} . У аквамарина и желтого берилла кривые поглощения обыкновенного луча аналогичны. Автор считает, что голубой цвет аквамарина получается за счет большей прозрачности в синей части спектра по сравнению с желтыми бериллами и за счет большего поглощения красной части спектра необыкновенной волной. Последняя почти не поглощается бериллами. Изумруд окрашен Cr . У изумруда, как у всех бериллов, наблюдается также максимум поглощения, вызываемый Fe^{+2} . Плеохроизм у бериллов слабый. Схема плеохроизма у желтых бериллов и у аквамаринов и изумрудов различна (табл. 28).

Таблица 28

Оптические свойства бериллов, по Грум-Гржимайло

Разновидность	Хромофор	Цвет по различным направлениям	Схема плеохроизма
Желтый берилл	Fe^{+2}	No — желтый Ne — более слабая желтая окраска	$No > Ne$
Аквамарин	Fe^{+3}	No — почти бесцветный Ne — голубой	$No < Ne$
Изумруд	Cr^{+3}	No — желто-зеленый Ne — голубовато-зеленый	$No < Ne$

С. В. Грум-Гржимайло и Л. А. Певнева (1956) изучили светопоглощение бериллов различных окрасок (фиг. 14). Выяснилось, что окраска вызывается в основном ионами Fe^{+2} в шестерной координации, изоморфно замещающими Al^{+3} . Для иона Fe^{+2} характерно поглощение в ИК-области спектра $\sim 800-850 \text{ м}\mu$ [соль Мора $FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$].



Фиг. 14. Светопоглощение бериллов, по Грум-Гржимайло и Певневой

Для уральских бериллов различной окраски наблюдается поглощение в ИК-области с максимумом $\sim 800 \text{ м}\mu$. Этот максимум выражен для обыкновенной волны (No) сильнее, чем для необыкновенной волны (Ne). У аквамаринов и желтых бериллов кривые спектрального поглощения для обыкновенной волны совпадают. У аквамаринов наиболее интенсивная окраска наблюдается в направлении перпендикулярно к оптической оси, у желтых бериллов — параллельно оптической оси. Кроме Fe , на окраску бериллов влияет Cr^{+3} , образующий на кривой поглощения изумрудов два максимума: в зеленой части и на границе между видимой и УФ-областями спектра. У некоторых изумрудов наблюдается еще третий пик в ИК-области. Авторы считают, что этот пик вызван присутствием ионов Fe^{+2} .

Из приведенного обзора следует, что окончательно установленной можно считать окраску изумруда, обусловленную ионами Cr^{+3} , что доказано совокупностью разных методов. О природе других окрасок берилла окончательное заключение сделать нельзя.

*О бурых, желтых, зеленых и голубых окрасках берилла,
обусловленных примесью железа*

В обзоре по истории изучения окрасок уже говорилось, что окраски бурых, желтых, зеленых и голубых тонов обусловлены примесью железа. Однако высказывались и другие точки зрения. Нам представляется, что выяснение причин этих окрасок нельзя сделать на основании только одних оптических измерений, хотя бы и детальных. Необходимо учитывать геологические и химические данные.

Обычно на большом месторождении бесцветных бериллов встречаются бериллы, окрашенные во всю гамму цветов голубых, зеленых, желтых тонов. Но бериллы одной жилы или занорыша имеют строго постоянную окраску на всех кристаллах, что говорит о постоянстве конкретных условий кристаллизации бериллов. Были подобраны бериллы разного цвета из трех участков одного месторождения из Восточной Сибири. Кристаллы каждого участка характеризовались определенным одинаковым цветом, хотя из-за разной толщины кристаллов интенсивность окраски менялась.

Отсюда можно сделать вывод, что во время кристаллизации берилла активность хромофоров в разных участках месторождения отличалась, но была постоянной в конкретных участках (жилах, занорышах).

Нахождение изучавшихся бериллов на одном месторождении, отсутствие существенных отличий в физических свойствах, кроме цвета, а с другой стороны, постоянно наблюдающаяся постепенность перехода цвета у кристаллов всего месторождения говорят о том, что общая причина появления окраски бериллов этого типа одна и та же, но наблюдающиеся изменения в условиях кристаллизации берилла влияли на изменение оттенка окраски. Это могло осуществляться только таким образом. Если окраска вызывается одним хромофором,— изменением его валентности; если окраска вызывается группой хромофоров,— изменением их количественного соотношения в составе берилла; если окраска вызывается одним хромофором, не меняющим валентность,— изменением его концентрации в составе берилла (так, например, изменяется окраска водного раствора медного купороса от зеленоватой через голубую до синей при увеличении концентрации).

Последнее предположение отпадает, так как у рассмотренных бериллов наблюдающаяся постепенность перехода окраски по оттенку, как правило, не сопровождается параллельным постепенным переходом по интенсивности окраски.

Наблюдаются голубые аквамарины почти бесцветные, голубые и густо-синие, такие же почти бесцветные, светло-желтые и янтарные до бурых гелиодоры.

Также меняют интенсивность окраски зеленые бериллы и другие бериллы с промежуточной окраской — желто-зеленой или зелено-ватоголубой.

В литературе предлагалось объяснять окраску голубого цвета примесями не только железа, но и скандия.

Было проведено изучение распределения Sc в бериллах разной окраски (табл. 29). Полученные результаты не показывают закономерной связи между содержанием Sc, типом окраски и интенсивностью голубой окраски берилла вопреки данным С. А. Боровика (1943).

У разноокрашенных бериллов определялось также содержание Fe_2O_3 и FeO и измерялся плеохроизм (табл. 30). Как видно из этой таблицы, в голубом берилле преобладает окисное железо, а в желтом — закисное. В зеленых бериллах окисное и закисное железо находятся в разных соотношениях.

Таким образом, оправдывается предположение, что окраска изученных бериллов вызвана одним хромофором, изменяющим свою валентность. Железо как нельзя лучше удовлетворяет этому требованию. Это заключение согласуется с выводами С. В. Грум-Гржимайло, сделанными на основании только оптического исследования.

Таблица 29

Содержание скандия в бериллах разного цвета

Характер берилла	Бесщелочные бериллы			Слабощелочные бериллы			Щелочные натровые бериллы	
	Из кварц-топазовых грейзенов, Сибирь			Из занорышей в гранитных пегматитах, КНР			Из альбитизированных гранитов, КНР	
Месторождения	Голубой	Зеленый	Бурый	Голубой	Зеленый	Желтый	Голубой	Желтый
Цвет								
Содержание, вес. %	0,002	0,002	0,0002	0,0004	0,0004	0,0001	0,0004	0,0025

Нами приведено измерение светопоглощения на разноокрашенных бериллах одного месторождения из Восточной Сибири (фиг. 15 а, б, в). Сопоставление кривых светопоглощения разноокрашенных бериллов показывает, что по положению в спектре минимума светопоглощения зеленые бериллы занимают промежуточное положение между голубыми и желтыми.

Таблица 30

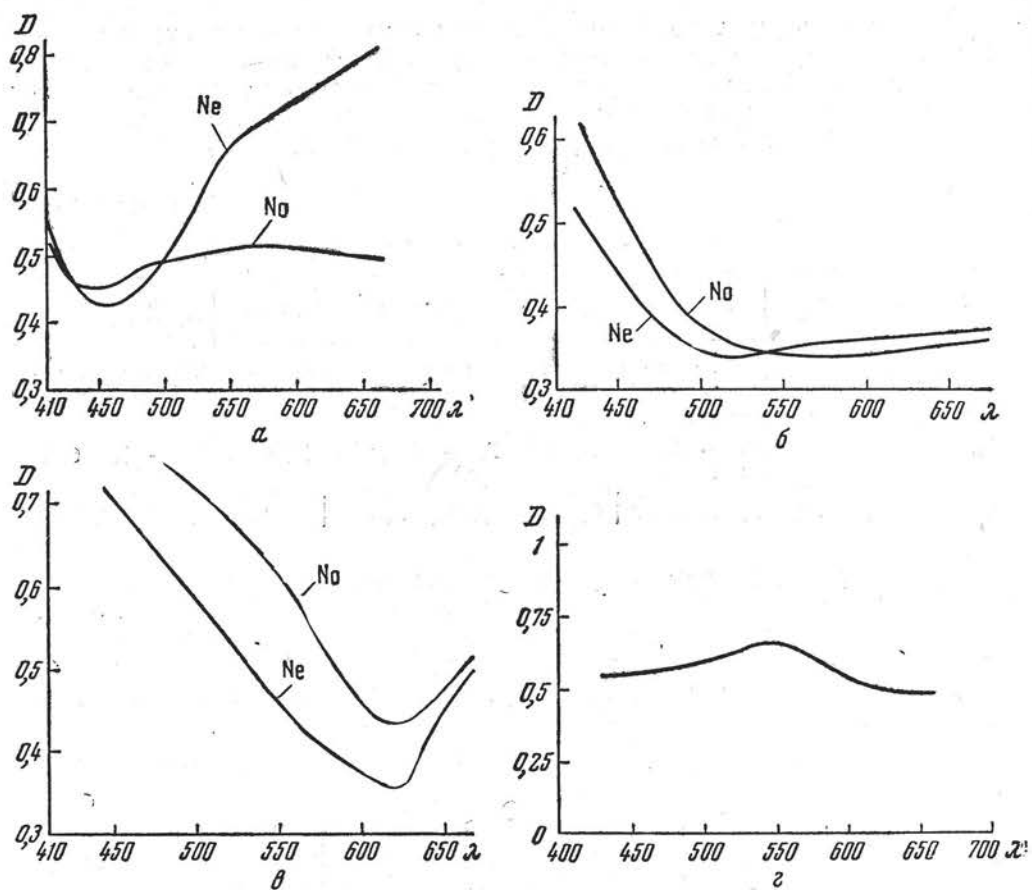
Содержание железа в разноокрашенных бериллах

Цвет берилла	Голубой	Голубовато-зеленый (салатный)	Зеленый	Зеленый	Оранжевый
Место	КНР	Европейская часть СССР	Сибирь	Казахстан	Сибирь
Fe ₂ O ₃ , вес. %	0,50	0,62	1,27	0,43	0,43
FeO, вес. %	Не обн.	Не обн.	Не обн.	1,07	0,98
Плеохроизм					
по No	Бесцветный	Желто-зеленый	Зеленый	Зеленый	Оранжевый
по Ne	Голубой	Голубовато-зеленый	Зеленый	Зеленый	Желтый

Таким образом, можно сделать вывод о том, что голубые бериллы образовывались в условиях большего окислительного потенциала, чем желто-зеленые бериллы, что находит подтверждение в геологических данных.

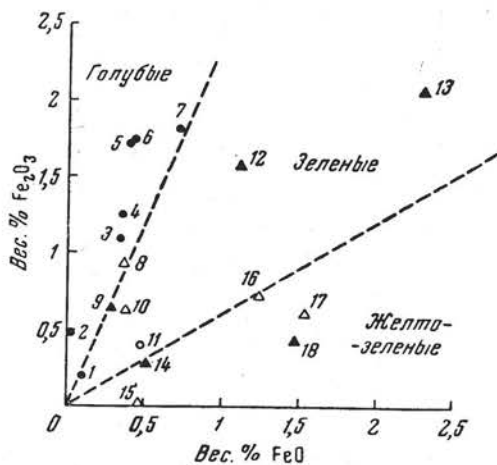
Так, в гидротермально-пневматолитовых месторождениях голубые бериллы ассоциируют с окисными соединениями металлов — гематитом, вольфрамитом, желто-зеленые бериллы — с сульфидами — молибденитом, пиритом.

Аналитические данные по известным нам определениям Fe₂O₃ и FeO в бериллах голубой, зеленой и желто-зеленой окрасок хорошо согласуются с представлениями о том, что голубая окраска вызвана примесью Fe⁺³, желтая — Fe⁺², зеленая — их совместным присутствием (фиг. 16). Для графика, изображенного на фиг. 16, отбирались только те анализы, где анализировались и Fe₂O₃ и FeO. К сожалению, в большинстве известных нам анализов железо определено общее в форме Fe₂O₃.



Фиг. 15. Светопоглощение бериллов разного цвета:

а — голубой; б — желто-зеленый; в — оранжевый; г — розовый; D — оптическая плотность.



Фиг. 16. Зависимость между отношением окисного и закисного железа в берилле и их цветом:

● — голубые бериллы; ○ — голубовато-зеленые; ▲ — зеленые; △ — желто-зеленые

*О причине розовой окраски
берилла и других Li-содержащих силикатов*

Весьма интересна розовая окраска бериллов. Были предположения, не основанные ни на каких точных оптических измерениях, что эта окраска вызвана Mn или щелочами (см. обзор по изучению окрасок берилла). И действительно, розовая окраска встречается только у щелочных бериллов и только у тех, в состав которых входит литий. В этом отношении розовые бериллы сходны с другими литиевыми и литийсодержащими розовыми силикатами.

Как литературные данные, так и наши собственные наблюдения позволяют сделать вывод о широком проявлении розовой окраски природных литиевых и литийсодержащих силикатов. Эта розовая окраска очень специфична. Иногда она имеет фиолетовый и сиреневый оттенок. При этом необходимо различать собственно литиевые розовые силикаты: 1) розовый сподумен (кунцит); 2) розовые литиевые слюды: лепидолит, циннвальдит (редко), полилитийонит; 3) розовый петалит (редко) и силикаты Mg и Al , содержащие литий как примесь: 1) розовый турмалин (рубеллит, эльбаит); 2) розовый мусковит; 3) розовый берилл (воробьевит, морганит, ростерит (редко)); 4) розовый амфибол (гольквистит); 5) розовый хлорит, кукеит (редко); 6) розовый маргарит (редко).

Все перечисленные минералы или группы минералов содержат в структуре шестикоординационный Al или Mg . Описанные в литературе или имевшиеся в нашем распоряжении розовые силикаты с литием всегда содержат повышенные количества марганца. Литиевые и литийсодержащие силикаты, окрашенные в зеленый, бурый и желтый цвет, иногда могут содержать марганец, но всегда содержат значительные количества железа.

Многочисленные силикаты алюминия и магния, но без лития, в розовый цвет не окрашены. Исключениями являются: минералы, содержащие Cr (хромовые хлориты фиолетового цвета), минералы, содержащие железо (альмандин), минералы, содержащие марганец (пеннантит, тулит).

Розовые силикаты с литием характерны для последних стадий интенсивного замещения в пегматитах и стадий редкометалльного щелочного метасоматоза в пневматолито-гидротермальных месторождениях.

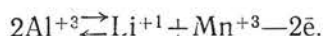
Еще А. Е. Ферсман (1940) подчеркнул характерные особенности конечных стадий пегматитового процесса: 1) обогащение большинства силикатов литием (турмалинов, бериллов) и выделение собственных литиевых минералов (литиевых слюд); 2) характерные розовые и фиолетовые окраски этих силикатов; 3) присутствие марганца в этих силикатах, который является возможной причиной их розовой окраски.

В. И. Вернадский (1908) объяснял розовую окраску некоторых розовых силикатов с литием (берилла) присутствием редких щелочей. Работами по измерению светопоглощения розовых турмалинов, лепидолита (Грум-Гржимайло и др., 1958) было показано, что в окрашивании розовых силикатов с литием участвует шестикоординационный Mn^{+3} .

Проведенное нами измерение светопоглощения розового берилла выявило сходный с другими розовыми литиевыми силикатами (лепидолитом, рубеллитом, кунцитом) (Грум-Гржимайло и др., 1952; Грум-Гржимайло, 1948, 1956; Claffy, 1953) характер спектра поглощения, вызванного присутствием шестикоординационного Mn^{+3} , что говорит об общей причине окраски всех розовых силикатов с литием (фиг. 15, г).

Из всего сказанного напрашивается наиболее вероятный вывод о том, что розовая окраска указанных силикатов обусловлена совместным присутствием в них Mn^{+3} и Li^{+1} . Обязательное наличие, кроме этих ионов, еще шестикоординационных Al^{+3} или Mg позволяет считать, что Li и Mn^{+3} в структурах розовых силикатов с литием размещены в октаэдрах из-под Al^{+3} или Mg (в некоторых силикатах часть Li располагается и в других позициях). Близость размеров ионов Li^{+1} , Mn^{+3} , Al^{+3} и Mg^{+2} согласуется с этим выводом.

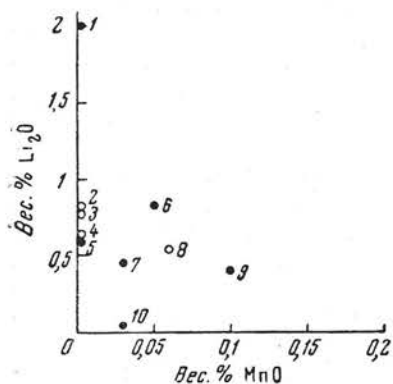
Литий совместно с марганцем замещают шестикоординационный алюминий в структуре берилла по следующей схеме:



Это уравнение требует дополнительного вхождения положительных ионов в структуру берилла, и это может осуществляться путем вхождения дополнительных ионов щелочей в берилл без удаления ионов бериллия, что обычно имеет место. Таким образом, в розовых

бериллах мы должны иметь небольшой недостаток атомов Al против 4 в элементарной ячейке и небольшой избыток атомов Be против его количества в бесцветных щелочных бериллах.

Аналитические данные по известным нам определениям MnO и Li_2O в бериллах бесцветных и розового цвета показывают, что бесцветные бериллы обычно содержат следы MnO (фиг. 17). При этом учитывались только те анализы, где анализировались и MnO и Li_2O . О влиянии Li на розовую окраску берилла определенных данных не обнаруживается.



Фиг. 17. Зависимость между содержанием MnO , Li_2O и цветом розовых и бесцветных бериллов:

● — розовые бериллы; ○ — белые

Кристалломорфологическое строение берилла

Макроморфология роста кристаллов берилла

Простые формы роста кристаллов берилла и их габитус

Берилл относится к гексагональной сингонии, дигексагонально-дипирамидальному виду симметрии $L_66 L_2 7PC$. Все известные для него простые формы относятся к следующим типам: пинакоид, гексагональные призмы первого и второго рода, дигексагональные призмы первого и второго рода, гексагональные дипирамиды первого и второго рода, дигексагональные дипирамиды первого и второго рода.

Число всех простых форм берилла, выраженных в индексах, огромно. В период описательной минералогии было определено основное число простых форм берилла и их комбинаций.

Главный вклад в это внесли работы Н. И. Кокшарова (1854, 1872; Kokscharow, 1852, 1858, 1862).

Работы описательного периода минералогии по выяснению простых форм на кристаллах берилла были подытожены Гольдшмидтом (Goldschmidt, 1913), в атласе которого сведены все известные к тому времени простые формы берилла и их комбинации. Наиболее распространенными формами являются следующие:

$$\{0001\}, \{10\bar{1}0\}, \{11\bar{2}0\}, \{10\bar{1}1\}, \{11\bar{2}1\}.$$

В XX в. гониометрические исследования не пользовались популярностью однако необходимо указать важнейшие работы.

Согласно Лакруа (Lacroix, 1910, 1911), Дюпарку, Вундеру и Заботу (Duparc, Wunoder, Sabot, 1911), Форду (Ford, 1907), в сильно щелочных бериллах наиболее хорошо развита форма $\{0001\}$, слабее дипирамида $\{11\bar{2}1\}$. Остальными характерными формами являются: $\{10\bar{1}0\}$, $\{10\bar{1}1\}$, $\{31\bar{4}1\}$, $\{11\bar{2}2\}$, $\{2131\}$, $\{20\bar{2}1\}$, $\{11\bar{2}0\}$, $\{3\bar{3}64\}$.

Для бесщелочных аквамаринов из грейзенов Шерловой горы, по П. П. Сушинскому (1923) и Н. Ю. Икорниковой (1939), характерны следующие формы: $\{10\bar{1}0\}$, $\{11\bar{2}1\}$, $\{61\bar{7}1\}$, $\{71\bar{8}1\}$, $\{81\bar{9}1\}$, $\{10. 1. \bar{1}1. 1\}$.

Химмель и Шмидт (Himmel & Schmidt, 1927) обнаружили новые формы на аквамарине из Юго-Западной Африки: $\{52\bar{7}4\}$, $\{7.4. \bar{1}1. 6\}$. Новые формы: $\{31\bar{4}0\}$, $\{32\bar{5}0\}$ открыли Паглиани и Мартиненги (Pagliani & Martinenghi, 1941).

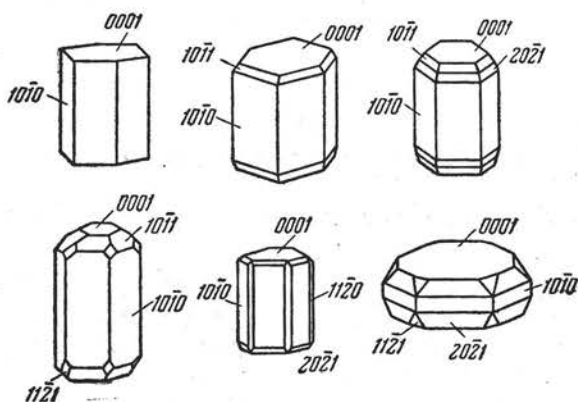
Родолико и Спакачна (Rodolico & Spacagna, 1943) на 317 кристаллах берилла обнаружили 27 известных форм с 40 комбинациями.

Наиболее характерные комбинации простых форм берилла представлены на фиг. 18.

Кристаллы берилла могут быть очень мелкими, например аксессуарный берилл в измененных гранитах. Крупные кристаллы берилла, особенно в пегматитах, не являются редкостью.

Палач (Palache, 1932) указывает, что в минералогическом музее Гарвардского университета хранится кристалл берилла весом в 18 т. Кристалл берилла весом в 200 т описан в Бразилии (Rolff, 1944).

Морфологическая классификация кристаллов берилла разработана В. В. Доливо-Добровольским (1936); кристаллы берилла им подразделяются на четыре типа: кристаллы вытянутого типа, кристаллы изометрического типа, кристаллы сплюснутого типа, кристаллы сильно-



Фиг. 18. Наиболее характерные комбинации простых форм берилла

сплюснутые. В каждом типе выделяются категории габитусов в зависимости от набора габитусных, рядовых и второстепенных граней. Примеры габитусных форм В. В. Доливо-Добровольским взяты из справочника Гольдшмидта (Goldschmidt, 1913).

Отношение $a : c$ у кристаллов берилла может колебаться в широких пределах — от 1 : 50 до 20 : 1. Наблюдаются игольчатые — тонкопризматические кристаллы, короткопризматические — бочонковидные, пластинчатые (табл. I, а, б, в; табл. II, а, б, в).

Нередко у кристаллов берилла наблюдается асимметричное развитие граней. За счет этого видимая симметрия берилла может понизиться. Например, за счет вырождения трех из шести призматических граней могут образоваться тригональные призмы. Могут получиться кристаллы псевдоромбической симметрии при вырождении противоположных двух из шести призматических граней или, наоборот, при аномально сильном их развитии (табл. II, г).

Зависимость габитуса кристаллов берилла от химического состава условий образования

Берилл в зависимости от химического состава и условий образования меняет свой габитус и набор простых форм.

Огромный фактический материал по этому вопросу разбросан в громадном числе работ, перечислить которые мы не имеем возможности. Некоторые обобщения этого материала для пегматитов сделаны А. Е. Ферсманом (1940).

Зависимость облика кристаллов берилла от содержания в нем щелочей и от типа месторождения детально разбиралась А. А. Беусом (1960).

По его данным, облик кристаллов берилла постепенно и закономерно меняется от длиннопризматического до пластинчатого. Бесщелочные

Бериллы из пегматитов характеризуются длиннопризматическим и призматическим габитусом (отношение $a:c$ от 1:15 до 1:2). Наиболее характерные формы — гексагональная призма и пинакоид, реже развита дипирамида. Кристаллы хорошо образованы. Бесщелочные бериллы из пневматолито-гидротермальных месторождений характеризуются тонкопризматическим габитусом. Для натровых бериллов из пегматитов наряду с призматической наиболее характерны конусовидные, усеченнопирамидальные формы. Характерны также «фаршированные» скелетные формы. Большинство кристаллов натрового берилла плохо огранено. «Натро-литиевые бериллы образуют три типа кристаллов:

- 1) конусовидного облика, без ясно образованных граней;
- 2) изометрической неправильной формы, без заметных кристаллических очертаний;
- 3) хорошо образованные гексагональные, короткопризматического (до таблитчатого) облика... Литиево-цезиевая разновидность характеризуется двумя последними типами, причем таблитчатые и пластинчатые формы очень характерны для этой разновидности (отношение $a:c$ до 15:1).

Приведенные данные вскрывают лишь эмпирическую зависимость габитуса кристаллов берилла от содержания в нем щелочей и от условий образования. К этому необходимо добавить, что длиннопризматический, игольчатый габитус характерен не просто для бесщелочных бериллов, а для тех разновидностей бесщелочных бериллов, которые содержат значительные количества примеси железа, особенно окисного. К таким бериллам относятся прежде всего некоторые аквамарины из гидротермально-пневматолитовых месторождений и реже из занорышей шпировидных пегматитов.

Эта эмпирическая зависимость может быть объяснена следующим образом. Когда в растворе образуются зародыши кристаллической структуры берилла и зародыши новых слоев около растущих граней кристаллов берилла, соотношение химических компонентов, участвующих в построении структуры берилла, определяет не только объем и форму элементарной ячейки берилла, но и характер анизотропного разрастания образовавшейся структуры. Если придерживаться точки зрения Н. В. Белова (1951, 1955, 1956), что кремнекислородная вязь приспособляется к элементам структуры, образованным катионами, выполняющими основную функцию, то при обилии щелочных атомов в растворе и недостатке бериллия легче всего разрастаются слои в плоскости 0001. Щелочные ионы способствуют образованию вокруг себя плоских колец из Si_6O_8 , параллельных 0001. Пустующие некоторые тетраэдры из-под бериллия характерны для щелочных бериллов и создают перерывы в вертикальных рядах.

Таким образом, имеются условия, способствующие преимущественному разрастанию структуры в плоскости 0001 и затрудняющие разрастание структуры в вертикальном направлении (фиг. 19, I).

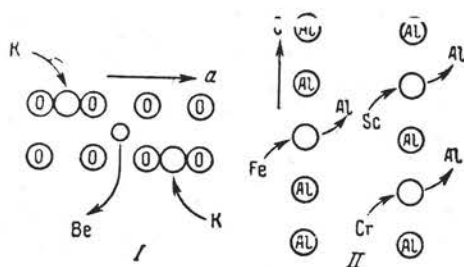
В бесщелочных бериллах образование новых колец Si_6O_8 затруднено. Вертикальные ряды из бериллиевых тетраэдров не имеют перерывов.

Ионы железа, замещающие алюминий в октаэдрах, также способствуют преимущественному образованию вертикальных структурных элементов, так как плоскость заполнения вертикальных рядов атомами Al в два раза больше, чем горизонтальных.

Таким образом, имеются условия, способствующие преимущественному разрастанию структуры вдоль оси C и затрудняющие разрастание структуры в плоскости 0001 (фиг. 19, II).

Аквамарины, не содержащие щелочей, так как замещение $Fe^{+3} \rightarrow Al^{+3}$ не требует их вхождения в структуру берилла, имеют, как правило, наиболее удлиненные вдоль оси C кристаллы.

Желтые бериллы, окрашенные Fe^{+2} и содержащие щелочи, компенсирующие остаточную отрицательную валентность, реже имеют длиннопризматический габитус.



Фиг. 19. Связь анизотропии разрастания структуры берилла с химическим составом:

I — разрастание в плоскости (0001); II — разрастание вдоль оси C

Приведенные данные хорошо согласуются с известными закономерностями: грани кристаллов стремятся покрываться наиболее плотно упакованными плоскостями (Шафрановский и Франк-Каменецкий, 1948), кристалл покрывается гранями, имеющими минимальную нормальную скорость роста и максимальную тангенциальную скорость роста.

Агрегаты и сростки кристаллов берилла

Кристаллы берилла образуют между собой разнообразные агрегаты: зернистые, параллельные сростания, сноповидные и радиально-лучистые агрегаты и сростки нескольких кристаллов в неориентированном положении.

Зернистые агрегаты характерны для участков свободной кристаллизации берилла в полостях выщелачивания в грейзеновых и гидротермальных месторождениях при массовом отложении берилла.

К центральному участкам полостей крупность кристаллов берилла увеличивается и увеличивается количество пустых промежутков между ними.

Параллельное сростание очень характерно для берилла. Наблюдаются все переходные формы от параллельных сростков берилла к скелетным формам угнетенного роста и к образованиям с грубой комбинационной штриховкой.

Распространенной формой сростка является сросток параллельно оси C нескольких субиндивидов или блоков так, что образующийся агрегат представляет единый кристалл с сечением в виде гексагона. Однако то, что он представляет сросток нескольких блоков с более низкой симметрией, хорошо выявляется благодаря швам сростания, наблюдаемым как со стороны граней призматического пояса, так и со стороны пинакоидальных граней, представленных тонкими бороздками. Наличие таких сростков выявляется также благодаря неодинаковому уровню пинакоидов отдельных частей сростка (табл. II, *d*, *e*). Пример таких кристаллов был ранее описан нами (Фекличев, 1962).

Параллельные сростки и друзообразные кристаллы берилла изучались ранее Н. И. Кокшаровым (1854), П. В. Еремеевым (1898) и другими.

Иногда отчетливо наблюдаемые в верхней части сростка швы сростания к основанию кристалла постепенно пропадают. Зато вверху при достаточной длине сростка может наблюдаться узкий просвет между блоками сростка. Это говорит о том, что кристалл, начинающий расти

от основания макроскопически как единое целое, вверх постепенно расщепляется так, что блоки в результате слабой непараллельности все больше отходят друг от друга. Микроскопически же швы срастания видны до самого основания, что говорит о росте в виде сростка с самого зарождения.

Наблюдается отчетливая связь между сростками параллельно оси C из большого количества блоков и кристаллами берилла с грубой вертикальной колебательной штриховкой. Отдельные вертикальные штрих-выступы толщиной от одного до нескольких миллиметров, пересекающие кристалл от основания до вершины, можно рассматривать и как блоки сростка (табл. III, *a*). Такие сростки характерны для некоторых бериллов из грейзенов и особенно для водянопрозрачных голубых бериллов из полостей среди гидротермальных жил в измененных ультраосновных породах. Среди последних месторождений наблюдаются также параллельные или близкие к параллельным сростки кристаллов берилла, состоящие из сотен тонких грубогексагональных волокон берилла, параллельных оси C (табл. III, *b, в*).

Срастания, параллельно оси C , наблюдаются и в метасоматических бериллах из замещенных гранитных пегматитов (табл. IV, *a, б*). Для изумрудов, метасоматически растущих в измененных ультраосновных породах в пределах и около трещин, также характерны грубопараллельные сростки (табл. IV, *в, г*). От них наблюдаются переходы к скелетным кристаллам. Иногда такие сростки выстилают поверхность трещин в метасоматической породе, образуя цепочки (табл. IV, *д*).

Сноповидные и радиально-лучистые агрегаты характерны для метасоматических бериллов, изумрудов (табл. V, *a, б*).

К закономерным сросткам кристаллов берилла можно было бы отнести двойники, но двойники у берилла, по-видимому, отсутствуют. На это указывается в большинстве минералогических справочников. Однако в литературе имеются краткие указания без достаточных доказательств (морфологических и структурных) на двойники у берилла. Парсонс (Parsons, 1932) указал на двойники призматических кристаллов берилла, у которых плоскость двойникования совпадает с гранью $(11\bar{2}2)$. Н. Ю. Икорникова (1939) отмечает двойникование берилла по плоскости $(40\bar{4}1)$. Пермен (Perhman, 1953) отмечал двойники в берилле вдоль (3141) и $(11\bar{2}0)$. Согласно Диру, Хови и Цузмену (Deer, Howie, Zussman, 1962), двойникование берилла редко наблюдается вдоль плоскостей (3141) , $(11\bar{2}0)$, $(40\bar{4}1)$ (?).

Рассмотрение структуры берилла не позволяет выделить структурные плоскости, благоприятные для двойникования. Аналогичное явление мы наблюдаем и у других минералов, обладающих кольцевой структурой и относящихся к средней сингонии, для которых или совсем не указываются двойники или имеются единичные недостаточно надежные указания.

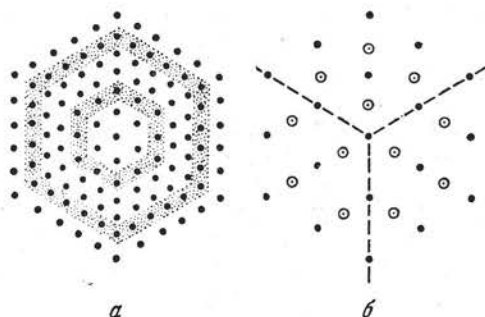
А. Винчелл и Г. Винчелл (1953) рассматривают секториальность аномальных двуосных кристаллов берилла как проявление двойникования, когда «гексагональные формы являются результатом двойникования трех- или шестиромбических неделимых, как у арагонита. В поперечном разрезе центральная часть такого двойника может быть одноосной».

Подобная трактовка строения оптически аномальных кристаллов неверна.

Секториальное строение оптически аномального кристалла обусловлено не поворотом структуры около какой-либо плоскости, а зональным распределением участков кристалла, отличающихся по химическому составу.

На фиг. 20 показано принципиальное отличие в секториальном строении, вызванном двойникованием и оптическими аномалиями.

Иногда наблюдаются неориентированные сростки ограниченного количества кристаллов берилла. При этом кристаллы взаимно



Фиг. 20. Секториальное строение кристаллов, вызванное разными причинами:

a — секториальность в виде оптических аномалий, вызванных зональностью состава кристаллов; *b* — секториальность, вызванная двойникованием

прорастают друг друга, оставляя глубокие углубления на гранях с индукционными поверхностями. Это характерно для кристаллов, растущих как свободным, так и метасоматическим путем (табл. VI, *a*, *б*).

Нарастания и срастания кристаллов берилла и других минералов

Выделяясь путем свободной кристаллизации, берилл, как и большинство минералов, редко образует изолированные кристаллы. Обычно он имеет хорошо ограненной только ту часть кристалла, которая не соприкасается при росте с другими минералами полости. Своим основанием кристаллы берилла нарастают на минералы, образующие стенки полости, и при одновременном росте последних срастаются с ними.

В большинстве случаев наблюдаются неориентированные нарастания берилла на эти минералы или их на берилл, или агрегаты, образованные их совместным ростом (табл. VI, *в*, *г*, *д*; табл. VII, *a*). Эти нарастания особенно характерны для полостей, занорышей.

Кристаллы берилла вместе с другими минералами участвуют в образовании друз на стенках полостей. В занорышах ранних гранитных пегматитов характерны срастания кварца (мориона), полевого шпата (микроклина, альбита), шерла, мусковита, берилла, аквамарина, в занорышах дифференцированных зональных гранитных пегматитов — срастание кварца, альбита, рубеллита, воробьевита, в полостях перекристаллизации в замещенных гранитных пегматитах — срастания ортоклаза, альбита, жильбертита, ростерита, в полостях среди грейзенов кислотного выщелачивания — срастания кварца, топаза, аквамарина, берилла, в полостях среди измененных ультраосновных пород — срастание берилла, мусковита, маргарита, турмалина, флюорита.

В некоторых гидротермально-пневматолитовых месторождениях наблюдаются срастания берилла с рудными минералами — пиритом, халькопиритом, арсенопиритом, молибденитом, гематитом, вольфрамитом, касситеритом (материалы Минералогического музея АН СССР).

В Минералогическом музее Горного института в Ленинграде выставлены бериллы, находящиеся в срастании с рудными минералами: арсенопиритом, касситеритом, вольфрамитом.

Берилл, выделяясь как более поздний минерал в полостях — занорышах, может образовывать на ранних минералах нарастания — рубашки. Так, известные рубашки мелкозернистого ростерита, агрегата ростерита с альбитом, образующие рубашки и присыпки на кристаллах микрорубина и мориона. В свою очередь известны рубашки и присыпки на кристаллах берилла более поздних минералов — альбита, жильберита, хлорита, мусковита, каолина, бертрандита, фенакита, бавенита.

Наблюдаются и ориентированные сростания с минералами, имеющими с бериллом сходные структурные элементы. К таким минералам относятся кварц, турмалин, мусковит и предположительно некоторые другие минералы. Параллельное сростание берилла с турмалином отмечает Фемистер (Phemister, 1940).

При осмотре коллекций Минералогического музея АН СССР нам встречались ориентированные сростания турмалина с бериллом. При этом оси симметрии и грани $(10\bar{1}0)$ кристаллов берилла и турмалина были параллельны. Среди таких сростаний преобладали ориентированные обрастания, которые мы подробно опишем среди фаршированных кристаллов берилла.

Закономерные сростания кварца в аквамарина описал И. Е. Каменцев (1963). Он выделяет четыре типа сростаний. Во всех четырех типах участвует грань $(10\bar{1}0)$. Она сростается:

- 1) с гранью $(10\bar{1}0)$ аквамарина в параллельном положении,
- 2) с гранью $(10\bar{1}0)$ аквамарина в положении, когда удлинение аквамарина перпендикулярно удлинению кварца,
- 3) с гранью $(10\bar{1}1)$ аквамарина так, что направления $[\bar{1}2\bar{1}0]$ аквамарина и кварца параллельны,
- 4) с гранью $(10\bar{1}0)$ аквамарина, так, что удлинение аквамарина образует с удлинением кварца угол, равный 48° .

Ориентированные вроски слюды как с поверхности берилла, так и в виде включений внутри кристаллов берилла наблюдались неоднократно.

Формы угнетенного роста

Берилл образует во многих случаях кристаллы, ясно указывающие, что они выросли в стесненных условиях, большей частью путем замещения вмещающей породы и минералов. Однако следует отличать формы угнетенного роста кристаллов, растущих в полости, но встречающихся на своем пути другие растущие минералы, при встрече с которыми остаются на обоих минералах взаимные отпечатки с индукционными гранями, и формы, образующиеся метасоматическим путем. Наблюдаются еще промежуточные формы, когда кристалл, находясь в стенке полости, одной частью растет метасоматическим путем, а другой частью — свободно или когда кристалл растет в полости среди жидкой, но вязкой среды. В последнем случае нередко образуются скелетные формы.

Микроморфология во многих случаях, но не во всех, позволяет отличать все эти способы образования форм угнетенного роста.

Когда кристалл растет свободно в полости и встречает на своем пути растущие или выросшие кристаллы других минералов, то образует с ними сростки. При этом участки граней, не встретившие препятствий, остаются зеркально гладкими, характерными для свободно кристаллизующихся минералов в полостях. Участки, встретившие на своем пути препятствие, имеют отпечатки и по морфологии резко отличаются от гладких участков граней (табл. VII, б). Поверхность их обычно неровная, с характерной грубой индукционной штриховкой (табл. VII, в) при совместном росте встретившихся кристаллов.

При встрече с уже сформировавшимися кристаллами других минералов на кристаллах берилла могут возникнуть отпечатки двух типов. Если встретившийся минерал совершенно не замещается бериллом, поверхность отпечатков на берилле гладкая, повторяющая морфологию встреченного кристалла. Но чаще кристаллы берилла благодаря своей высокой кристаллизационной силе частично замещают встретившиеся кристаллы. При этом в месте их соприкосновения на берилле остается рельеф, грубо повторяющий морфологию встреченного кристалла, но микроскопически на берилле наблюдается рельеф, характерный для метасоматического роста, а на кристалле замещаемого минерала — рельеф замещения. Этот рельеф можно распознать микроскопически.

Особый интерес представляет угнетенный рост кристаллов берилла метасоматическим путем среди агрегата других минералов. Образующиеся в этом случае кристаллы нередко хорошо образованы, как будто они росли в полости, однако грани их не зеркальны, а имеют равномерный, разной степени расчлененности, метасоматический рельеф. Такие хорошо образованные кристаллы встречаются в мелкозернистых и равномернозернистых и чаще всего мономинеральных породах, например кристаллы изумруда среди мелкозернистого агрегата тремолита или талька, среди сливного кварца, среди мелкозернистого альбита или среди слюды. Большой частью рельеф этих кристаллов виден макроскопически (табл. VII, 2), но особенности его строения, доказывающие его метасоматическое происхождение, видны под микроскопом.

Хорошо образованные, метасоматически выросшие кристаллы берилла в мелкозернистых породах встречаются тогда, когда метасоматический процесс прошел до конца. Если мы застаем начало этого процесса или его промежуточные стадии, то метасоматически растущие кристаллы берилла обычно не образованы столь хорошо (табл. VIII, а, б). Причем можно проследить все переходы от начальных стадий формирования порфиробласт берилла, неправильной формы, часто имеющих внутри пойкилитовые реликтовые включения, до однородных хорошо образованных кристаллов берилла.

То, что степень идиоморфизма не может являться критерием, позволяющим отличать свободный и метасоматический рост кристаллов, отмечали В. Д. Никитин (1955) и А. А. Беус (1961).

А. А. Беус (1961), разбирая механизм образования идиоморфных кристаллов, редкометальных минералов в процессах замещения, предложил следующую его схему:

1. Изменение состава замещающего раствора на границе с замещаемым минеральным комплексом, сопровождаемое увеличением рН.

2. Распад подвижного ацидокомплексного соединения редкого элемента, сопровождающийся выделением диссоциированных анионов сильных кислот. Образование зародыша кристалла редкометального минерала. В пленке раствора, окружающего кристалл, резко уменьшается концентрация редкометального комплекса и увеличивается концентрация кислот.

3. Диффузия редкометальных ацидокомплексов из питающего раствора в пленку раствора, окружающую кристалл; она идет параллельно с растворением замещаемого минерала, на границе с кристаллом.

4. Увеличение рН раствора, окружающего кристалл, в процессе реакции с замещаемым минералом, вызывающее распад диффундированных редкометальных ацидокомплексов и нарастание нового слоя на грани кристалла редкометального минерала. Эту схему А. А. Беус распространяет на берилл, кристаллизующийся в пегматитах.

При метасоматическом росте в неоднородной среде или неравномерном питании необходимыми для кристаллизации компонентами вырастают кристаллы берилла неправильной формы, с искаженной симмет-

рней и плохо образованными гранями (табл. VIII, в, г). Однако равномерное покрытие всей поверхности кристаллов берилла рельефом метасоматического роста отличает эти формы роста от форм угнетенного роста в полости. Наиболее характерны конусовидные формы (табл. VIII, д, е; табл. IX, а), на которые ранее указывал А. А. Беус (1960), также желобчатые, корытовидные кристаллы (табл. IV, б).

На особенностях формирования берилла в пегматитовых жилах детально останавливается И. Я. Дядькина (1962). Исследование проведено на примере гранитных пегматитов Средней Азии, в которых берилл выделяется метасоматическим путем. Ею показано, что форма берилла зависит не от принадлежности его к той или иной генерации, а от ряда других факторов. Наиболее характерная форма кристаллов берилла желобчатая с подковообразным поперечным сечением. Причина возникновения желобчатых форм берилла заключается в неравномерном питании кристалла при его росте в твердой среде. И. Я. Дядькина дает схемы механизма роста кристалла в твердой среде, используя фактический материал по бериллу.

От желобчатых форм к хорошо образованным кристаллам метасоматические кристаллы берилла переходят обычно через стадию образования фаршированного кристалла, когда желобчатый кристалл, разрастаясь, далее смыкается по всему периметру поперечного среза и заключает внутри себя замещаемую породу (табл. IX, в, г). Возникают кубковидные, фаршированные кристаллы (табл. X, а, б), ранее описанные А. А. Беусом (1960).

Однако фаршированные кристаллы берилла нельзя целиком объяснить только захватом внутрь метасоматически растущего кристалла ранее существовавшей породы. С ней происходят также глубокие изменения. В фаршированных кристаллах нередко наблюдаются в внутренней части ориентированные сростания с минералами, имеющими близкую структуру, например турмалином (табл. X, в, г). Кристаллы берилла не просто обрастают кристаллами турмалина. Наблюдаются фаршированные кристаллы берилла, где кристаллы турмалина, а также мелкие кристаллы берилла, параллельно ориентированные с большим фарширующим кристаллом берилла, отделены от него другими минералами: альбитом, кварцем, мусковитом и др. (табл. XI, а).

По-видимому, не только берилл, но и многие другие минералы, участвующие в начинке фаршированных кристаллов, растут одновременно метасоматическим путем. Параллельный рост некоторых из них, имеющих близкую структуру, энергетически более выгоден. Особенности роста больших желобчатых, фаршированных кристаллов указывают на то, что во время их роста в пределах пространства, где осуществляется их рост, существует единое энергетическое поле, заставляющее параллельно ориентироваться на расстоянии и в пределах большого объема кристаллизующееся вещество.

Скелетные кристаллы возникают при свободном росте берилла в вязкой, но податливой среде, например, в полостях — занорышах пегматитов, заполненных глиной. На кристаллах берилла в этом случае образуются значительные выступы, которые уже нельзя рассматривать элементами обычного рельефа кристаллов (табл. XI, б, в, г; табл. XII, а).

В трещинах среди мелкозернистых пород также могут возникнуть скелетные кристаллы берилла, но растущие метасоматически (табл. XII, б). Скелетные кристаллы берилла в кварце, по-видимому, росшие метасоматически, отметил Фемистер (Phemister, 1940).

Огранка выступов скелетных кристаллов берилла отвечает с той или иной степенью приближения простым формам берилла: призме, пинаконду и дипирамиде. По микрорельефу можно определить, образовался

ли скелетный кристалл в полости или метасоматическим путем. От скелетных кристаллов можно наблюдать переходные формы к сросткам кристаллов берилла, состоящим из параллельно сросшихся субиндивидов или сросшихся в положении, близком к параллельному.

Особым примером угнетенного роста являются кристаллы берилла, выросшие в занорыше в условиях постепенного снижения верхнего уровня раствора в нем, в результате чего головки кристаллов берилла постепенно обнажались и переставали расти и возникали конусовидные кристаллы (табл. XII, в, г) (Фекличев, 1962).

Метаморфизованные кристаллы берилла

Так же как большинство природных кристаллов, кристаллы берилла в месторождениях нередко подвергаются метаморфизму. Неодинаковое приложение динамических усилий к большим кристаллам берилла приводит к образованию трещин, заполняющихся вакуумом и растворами с образованием мнимо вторичных и вторичных газовой-жидких включений. При более существенных усилиях может произойти смещение участков кристалла относительно друг друга и заполнение трещин другими минералами с образованием прожилков. Наиболее податливы к разрыву плоскости плоскости (0001) и $(10\bar{1}1)$ в структуре берилла. На табл. XII, д; XIII, а, б показаны примеры метаморфизованных кристаллов берилла, в которых трещины разрыва залечены альбитом, кварцем и флогопитом.

Наблюдаются случаи, когда смещенные участки метаморфизованных кристаллов берилла плотно спаиваются друг с другом, так что трещина полностью залечивается с образованием небольшого количества газовой-жидких включений. При этом может даже происходить частичное зарастание метаморфизованного кристалла. Такие случаи наблюдались на некоторых кристаллах из занорышей в пегматитах.

При постепенных и длительных нагрузках могут возникать изогнутые кристаллы берилла без существенных разрывов плоскости или с образованием веера трещин в месте максимального растяжения (табл. XIII, в)

Микроморфология роста кристаллов берилла

Микроморфология кристаллов берилла изучалась недостаточно широко. Немногочисленные наблюдения скульптур роста на гранях кристаллов берилла сведены в справочнике Гольдшмидта (Goldschmidt, 1913). Фигуры роста и особенно штриховка на кристаллах берилла и аквамарина были описаны А. Н. Карножицким (1891, 1895), П. В. Еремеевым (1895, 1898), П. П. Сушинским (1928), Н. Ю. Икорниковой (1939), К. К. Матвеевым (1955), Спенсером (Spencer, 1927).

Видиальные пирамиды роста со спиральным строением на кристаллах с дислокациями, предсказанные теоретически Бартоном, Кабрера и Франком (Burton, Cabrera, Frank, 1949, 1951), были впервые экспериментально обнаружены на кристаллах берилла Гриффином (Griffin, 1950). Правда, эти первые наблюдения недостаточно убедительны. Скульптуры роста в виде замкнутых петель в форме бритвенных лезвий, имеющие высоту ступеней по измерению методом многолучевой интерферометрии менее 34 Å, на основании их формы были интерпретированы как спирали роста, вызванные винтовыми дислокациями. Гриффин (Griffin, 1951) нашел на посеребренных гранях призмы $\{10\bar{1}0\}$ кристаллов берилла слои роста толщиной до 100 Å. Минимальная средняя толщина слоев роста на той же грани определена интерферометрически в $8,5 \pm 1$ Å.

Зегер (Segeг, 1953) приводит микрофотографии скульптур роста на поверхности кристаллов берилла из Бразилии.

Уникальной по своей скрупулезности и тщательности исследования является работа Г. Л. Вазбуцкого (1956) по исследованию скульптуры поверхности кристаллов берилла. При определении символов мелких граней им была применена новая методика — измерения на столике Федорова в отраженном свете под микроскопом. Наиболее интересен оказался рельеф роста на гранях пинакоида. Тонкорельефные зонарные (концентрические) узоры на гранях пинакоида отражают ступенчато-слоистый рост.

Показано, что торцы растущих слоев имеют простые символы, что «кристаллы состоят из различного размера комплексов, из которых молекулы слагаются в слои, слои — в системы. Системы могут слагаться в блоки, а блоки — в монокристаллическое целое». Получены интересные данные о закономерностях развития слоев роста: срастания слоев и зарастания их дефектов.

А. Варма (1958) форму скульптур в виде «бритвенных лезвий» на кристаллах берилла интерпретирует с помощью двумерной полярной диаграммы, характеризующей зависимость скорости роста от кристаллографического направления: «Почти прямые продольные края параллельны оси *C* и соответствуют плотно упакованному направлению, имеющему минимальную скорость роста. Два поперечных края внешней замкнутой петли по форме очень близки к дугам одной и той же окружности, так что в пределах $\pm 30^\circ$, ограниченных этими краями, скорость роста не должна зависеть от ориентировки. Полярная диаграмма для берилла... совпадает с контуром «лезвия» по круговым дугам на концах и в средних точках продольных краев.

Пунктирная часть диаграммы точно не определена, и из имеющихся данных можно сказать только то, что полярная диаграмма должна лежать вне этих частей».

*Микрориссталломорфологический анализ формы,
симметрии, ориентировки и расположения
фигур роста на различных гранях кристаллов берилла*








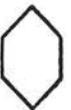
























Как показало микроскопическое исследование большого количества кристаллов берилла, почти всегда образование нового слоя роста на гранях берилла начинается не у вершин или ребер, а в плоскости грани, чаще всего в центральных ее частях. Обычно центр нового слоя представлен фигурой роста — единичной геометрически правильной положительной скульптурой на гранях, обладающей определенной повторяющейся морфологией, симметрией и ориентировкой для определенной грани определенного кристалла.

Форму, симметрию и ориентировку фигур роста удобно изображать в виде плоских реберных форм (Шафрановский, 1961), которые ограничивают сечение пространственных форм роста определенными гранями.

По плоским реберным формам построены пространственные формы роста.

Наиболее часто встречающиеся формы фигур роста на кристаллах берилла, полученные из плоских реберных форм роста на важных гранях берилла, представлены на фиг. 21. Всего их 7. После прибавления к ним их дигексагональных аналогов общее число простых форм роста достигнет 13. Как мы видим, количество простых пространственных форм роста, выведенных по плоским реберным формам фигур роста на гранях кристаллов берилла, почти равно максимальному количеству простых пространственных форм кристаллов берилла (берилл относится к дигексагонально-дипирамидальному виду симметрии).

Угловые величины и отвечающие им направления ребер фигур роста на важных гранях кристаллов берилла повторяются особенно часто. Например, следующие направления ребер, составляющих острый угол с осью c на грани $(10\bar{1}0)$, повторялись чаще всего: 27, 46, 64°.

Пространственная (гранная) форма	Плоская реберная форма на грани			
	$10\bar{1}0$	0001	$10\bar{1}1$	грань
<i>Пинакоид</i>		—	—	—
		—	—	—
<i>Гексагональная призма первого рода</i>				
<i>Гексагональная призма второго рода</i>				
<i>Гексагональная дипирамида первого рода</i>				
<i>Гексагональная дипирамида второго рода</i>				
<i>Гексагональная разорванная дипирамида первого рода</i>				
				
<i>Гексагональная разорванная дипирамида второго рода</i>				
				

Фиг. 21. Формы роста на важных гранях кристаллов берилла

Выведенные из них пространственные формы гексагональных дипирамид отвечают формам: $\{11\bar{2}1\}$, $\{11\bar{2}2\}$, $\{11\bar{2}4\}$.

На табл. XIV, $a - e$ показаны характерные примеры фигур роста (простых форм и их комбинаций) на различных гранях берилла и для различных условий роста.

Симметрия фигур роста обычно отвечает симметрии грани, на которой она расположена. Однако иногда наблюдаются отступления от симметрии грани в фигурах роста при сохранении геометрических направлений, ограничивающих фигуры роста. Наблюдается понижение симметрии фигуры роста по сравнению с симметрией грани.

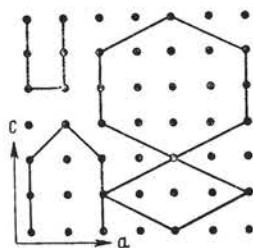
Фигуры роста для кристаллов из определенного месторождения характеризуются постоянными определенными угловыми величинами и их определенным набором.

Путем наблюдения взаимоотношений фигур роста, имеющих разную форму и развитых на одноименных и разноименных гранях, путем выявления постепенных переходов между фигурами роста, имеющими разную форму, удается установить родство всех скульптурных форм роста, одновозрастность их образования для кристаллов берилла из одного месторождения или его участка (жилы, занорыша).

Связь формы фигур роста и их ориентировки с тонкой структурой берилла

Единичные фигуры роста на гладкой грани берилла имеют правильную геометрическую форму с гранями, имеющими рациональные индексы и плоскую поверхность. Плоскости этих граней параллельны поверхности с наибольшей ретикулярной плотностью в структуре берилла, а линии пересечения фигур роста с поверхностью грани кристалла (ребра фигур роста) параллельны рядам с максимальной ретикулярной плотностью в структуре берилла (фиг. 22).

Ориентировка фигур роста также связана с тонкой структурой берилла. Фигуры роста одинаковой формы располагаются на грани одинаково так, что все одноименные их геометрические направления параллельны.



Фиг. 22. Связь формы и ориентировки фигур роста с ретикулярной плотностью рядов на грани ($10\bar{1}0$)

Фигуры роста как центры нового слоя на гранях кристаллов берилла и условия образования гранного рельефа

Микроструктуроморфологический анализ устанавливает, что единичные фигуры роста могут рассматриваться как центры нового слоя на гранях кристаллов берилла.

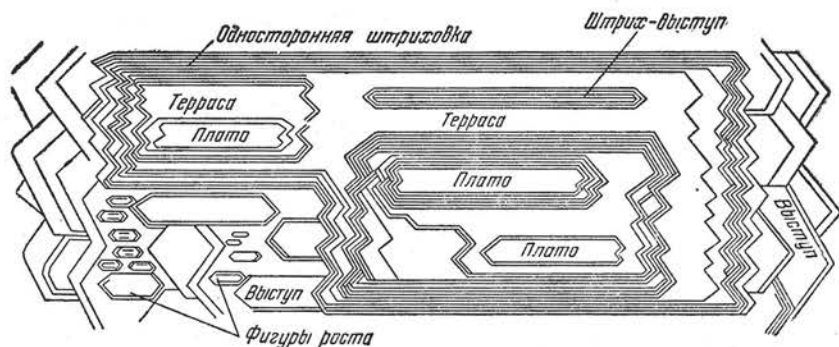
В зависимости от конкретных условий роста фигуры роста на гранях очень редки или обильны. Обычно грань ими покрыта равномерно, но иногда они приурочены к определенным участкам граней. На табл. XIV, *д* показаны многочисленные равномерно распределенные фигуры роста на грани кристалла берилла. На табл. XV, *а, б* представлены скульптуры роста на гранях кристаллов берилла, возникшие путем слияния единичных фигур роста при их разрастании в тангенциальном направлении (в плоскости грани).

Наблюдения над колебательной штриховкой и также послойным ростом как наиболее распространенными и характерными типами скульптур роста на гранях кристаллов берилла и опубликованные данные (Фекличев, 1960, 1961, 1962) позволяют отчетливо представить процесс образования гранного рельефа роста на кристаллах берилла как разрастание фигур роста.

Отсутствие идеально гладких граней на любых кристаллах берилла говорит о том, что рельеф на гранях растущих кристаллов берилла присутствует постоянно. Несοизмеримость глубин рельефа на грани с толщиной кристалла перпендикулярно к грани, наблюдаемая в большинстве случаев (толщина кристалла обычно превосходит глубину рельефа на 3—4 порядка, но может превосходить от 1 до 7 порядков), свидетельствует о постоянной миграции элементов рельефа (фигур роста, штрихов — выступов, торцов слоев) в плоскости грани.

Образование гранного рельефа в виде послойного роста

Рельеф обычного послойного тангенциального роста имеет обычно небольшую расчлененность при малой толщине слоев и относительно большой площади распространения гладкой поверхности слоя. При этом наблюдается небольшое количество центров нового слоя (единицы, реже десятки). Рельеф послойного обычного роста наиболее характерен для кристаллов берилла, выросших в занорышах пегматитов. На гранях этих кристаллов виден сложный ступенчатый рельеф. Ступени и слои, поверхность которых параллельна плоскости грани, а ребра параллельны ребрам элементарных фигур роста, выступая друг



Фиг. 23. Основные типы скульптур послойного роста на грани $(10\bar{1}0)$ кристаллов берилла

над другом, образуют террасы и плато. При близком расположении и параллельности торцов ступеней роста друг к другу образуется односторонняя штриховка послойного тангенциального роста. На фиг. 23 показаны основные типы скульптур послойного роста на важных гранях кристаллов берилла. На табл. XV, в, г приведены примеры послойного роста на гранях кристаллов берилла. При рассмотрении их мы убеждаемся, что, как бы ни был сложен рельеф послойного роста, количество геометрических элементов, участвующих в нем, ограничено геометрическими элементами элементарных фигур роста. Причем наблюдаются все постепенные переходы между фигурами роста и скульптурами послойного тангенциального роста.

Особый интерес представляло изучение толщины единичных слоев роста. Макроскопически на некоторых кристаллах наблюдались слои роста, имеющие толщину в 0,01—0,1 мм и даже в 1 мм. Однако детальное исследование природы торцевых участков слоев роста вскрыло их ступенчатую природу. Также иногда видно, что толстый слой с резкими высокими торцами на своей поверхности имеет также слои роста, торцы которых в отдельных участках не достигают торцов толстого слоя. Это позволяет считать образование толстых слоев роста следующим образом. Элементарный тонкий слой роста, возникший из одного или нескольких центров роста нового слоя в виде фигур роста, быстро разрастается в плоскости грани, занимая определенную площадь. В случае, если на грани имеются микротрещины, швы, отделяющие блоки несовершенного кристалла, дислокационные линии, линии с адсорбированными примесями или другие линии, могущие стать препятствием на пути тангенциального распространения слоя, они ограничивают распространение первичного элементарного слоя.

Возникающие на поверхности получившегося плато центры новых слоев разрастаются также не дальше пределов подстилающего слоя.

При многократном образовании и разрастании новых элементарных слоев может получиться значительно толстый слой с гладкой поверхностью.

Интерферометрическое исследование показывает, что толщина элементарных слоев роста с торцами, не имеющими ступенчатой природы, колеблется от 10 до 1000 Å.

Образование гранного рельефа в виде колебательной штриховки

Рельеф в виде колебательной штриховки более расчлененный, чем рельеф послыного роста. Количество центров новых слоев в виде единичных фигур роста велико. Причем они располагаются вдоль определенных направлений и, сливаясь, образуют штрихи-выступы.

Рельеф в виде колебательной штриховки наиболее типичен для аква-маринов из занорышей в грейзеновых месторождениях, причем только для граней призматического пояса и особенно для граней призмы $\{10\bar{1}0\}$ (Фекличев, 1961). Опишем эти явления с привлечением ранее опубликованных данных (Фекличев, 1961), но с новыми иллюстрациями.

Основные свойства колебательной штриховки следующие:

- 1) штриховка развита на всех гранях простой формы, для которой она характерна;
- 2) может наблюдаться несколько направлений штриховки на одной и той же грани;
- 3) макроскопически штрихи определенной системы штриховки, развитые на одной грани, параллельны;
- 4) штриховка неравномерно покрывает всю грань;
- 5) каждый отдельный штрих имеет тенденцию протягиваться через всю грань;
- 6) штрихи-выступы чередуются со штрихами-углублениями (колебательный характер этой штриховки);
- 7) штрихи-выступы (штрихи-углубления) могут значительно различаться как по ширине, так и по амплитуде уровней поверхностей, но в среднем они одинаковы для каждого кристалла.

Под микроскопом устанавливается сложная природа штриховки как результат послыного тангенциального анизотропного роста. Штрихи-выступы наблюдаются в сопряжении со штрихами-углублениями; и те и другие имеют различную высоту и ширину. Амплитуда поверхности сопряженных штрихов-выступов и штрихов-углублений различна (от долей микрона до долей миллиметра), и расположенные на одной грани штрихи-углубления обладают разным уровнем поверхности дна. Однако в некоторых местах (на широких макроскопически гладких участках граней и на поверхности широких штрихов-выступов и штрихов-углублении) наблюдается штриховка, образованная узкими параллельными штрихами-выступами, которые по ширине значительно меньше, чем расположенные между ними штрихи-углубления; уровень поверхности дна последних один и тот же (табл. XV, *д*).

Штрихи имеют слоистое строение, толщина отдельных слоев -- от долей микрона до сотых долей миллиметра. Боковые торцовые поверхности штрихов осложнены ступенчатыми террасами (табл. XVI, *а*). Обычно штрихи-выступы построены симметрично, поэтому поверхности отдельных слоев ступеней с боковых сторон штрихов-выступов лежат на одном уровне.

При микроскопическом исследовании обнаруживается прерывистость штрихов-выступов и их верхних слоев, что проявляется в цепочкообразном расположении (линия цепочки параллельна общей системе штриховки) удлиненных выступов, чаще всего параллелепипедальной

формы (табл. XVI, б). На определенных участках грани отдельные штрихи-выступы прерываются, а затем возникают вновь на тех же линиях, на которых протягивались до перерыва.

В строении таких прерывистых штрихов участвуют фигуры роста в виде шестиугольников, ромбов, квадратов, параллелепипедов (табл. XVI, в, г), реже в месте перерыва наблюдается постепенное сужение, выклинивание штрихов-выступов.

То, что перерыв штрихов-выступов и отдельных слоев порожден ростом, а не последующим растворением, доказывается отсутствием достаточно крупных скульптур растворения на гранях изученных кристаллов.

Этот перерыв не обусловлен скалыванием отдельных участков штрихов-выступов, на что указывают геометрически правильная форма их концов и постепенное выклинивание штрихов-выступов в местах перерыва.

В непрерывающихся штрихах-выступах часто можно увидеть торцы слоев, принадлежащих фигурам роста, в результате слияния которых образовался штрих-выступ (табл. XVI, г, д). Благодаря тому, что рост штрихов-выступов осуществляется часто таким путем, их края при общей тенденции к прямолинейности все же часто имеют сложную пилообразную форму и ступенчатые выступы.

Таким образом, совершенно отчетливо устанавливается, что прямолинейные штрихи-выступы образуются в результате слияния элементарных фигур роста, возникающих на гранях кристаллов берилла вдоль определенных линий.

В наибольшей степени на гранях гексагональной призмы кристаллов берилла развита вертикальная штриховка, в меньшей степени — поперечная и еще реже — диагональная под углом 26° к оси *a*. Если одновременно развиты несколько систем штриховки, элементы которых пересекают друг друга, обычно преобладает вертикальная штриховка; при этом (широкие, с наибольшей высотой) штрихи-выступы, как правило, наиболее развиты. В местах пересечения штрихов-выступов разных систем штриховки более высокие обычно перекрывают более низкие, однако после пересечения низкий штрих-выступ вновь следует по той же линии, как и до пересечения (табл. XVII, а, б).

Микроскопические наблюдения показывают, что существует тенденция к параллельности как краевых частей слоев в штрихах, так и самих штрихов.

Однако часто наблюдаются отклонения от параллельного общего направления всей системы штриховки. Некоторые узкие прямолинейные штрихи-выступы на несколько градусов отклоняются от основного направления штриховки (табл. XVII, в, г).

Отчетливо наблюдается такая закономерность: чем толще слой ступени, участвующей в строении штрихов, тем более правильные геометрические очертания он имеет. Благодаря этому и выдерживается общая параллельность штриховки, так как на грани мало плоских участков, покрытых тонкими неровными слоями, а в основном распространена система сопряженных штрихов-выступов и штрихов-углублений, образованных толстыми слоями, обычно с параллельными торцовыми поверхностями. То же характерно и для штрихов-выступов в целом: чем выше штрих-выступ, тем более прямолинейны его края, а сам он строго параллелен общему направлению системы штриховки.

Помимо отклонения от основного направления прямолинейных штрихов-выступов, наблюдается криволинейная колебательная штриховка (Фекличев, 1960). Криволинейность характерна для отдельных штрихов-выступов при колебательном характере штриховки и для ребер слоев

роста при односторонней штриховке. Верхние слои, из-под которых выступают нижние слои при ступенчатой структуре штриховки, часто наследуют место и форму криволинейных участков нижних слоев. Масштаб этого явления от слоя к слою может меняться.

Криволинейная штриховка характеризуется всеми промежуточными переходами к прямолинейной комбинационной штриховке, имеющей преобладающее развитие на гранях призмы $\{10\bar{1}0\}$ кристаллов берилла, и тесно пространственно связана с нею.

Отклонение направления криволинейных штрихов-выступов и криволинейных краев слоев роста от общего направления штриховки на грани не более $10\text{--}20^\circ$ в ту и другую сторону и криволинейные штрихи сохраняют общее стремление к вертикальному направлению колебательной штриховки.

Отдельные криволинейные и прямолинейные штрихи-выступы при колебательном характере штриховки иногда пересекаются в разных направлениях под углом не более $10\text{--}20^\circ$, перекрывая друг друга или выступая один из-под другого. Криволинейные штрихи-выступы, так же как и прямолинейные, образуются из элементарных фигур роста, располагающихся вдоль определенных линий (табл. XVII, *д*, *е*).

На табл. XVIII, *а*, *б* видно, что криволинейные штрихи-выступы и прямолинейные штрихи-выступы, отклоняющиеся от основного направления, развиты около глубоких каналов на гранях. Каналы параллельны плоскости пинакоида и, по-видимому, являются швами, отделяющими отдельные блоки в кристаллах берилла. В каналах и в прилегающих к ним областях отложение вещества берилла осуществлялось с большим трудом. Хорошо наблюдается стремление штрихов-выступов с приближением к шву (каналу) повернуть в сторону от основного направления или исчезнуть.

Статистическое распределение основных направлений штрихов-выступов указывает на значительное преобладание вертикального направления (параллельного направлению штриховки) над поперечным и диагональным. По нашему мнению, причина кроется во внутренней структуре берилла.

В последнее время все более выясняется, какое большое значение в морфологии кристаллов имеют ряды с максимальной одномерной ретикулярной плотностью.

Так, Н. В. Белов (1951, 1955, 1956) приводит несколько примеров, характеризующих значение подобных рядов в морфологии минералов и других физических свойствах. Он считает, что форму кристаллов некоторых силикатов характеризует не столько мотив, образованный кремнекислородными тетраэдрами, сколько цепи из полиэдров, заполненных катионами, выполняющими в кристаллической структуре основную, а не кислотную функцию, такими, как Al, Mg, Ca.

Нами проведено сопоставление наиболее часто встречающихся направлений колебательной штриховки с направлениями рядов на грани $(10\bar{1}0)$ с максимальной плотностью заполнения центрами элементарных ячеек берилла (рядов с максимальной ретикулярной плотностью) и с направлениями рядов на грани $(10\bar{1}0)$ с максимальной плотностью заполнения атомами Al.

Очень часто встречаются три направления штриховки на грани призмы $\{10\bar{1}0\}$ кристаллов берилла в порядке убывающей степени распространения: вертикальная, образующая угол 90° с осью *a*; горизонтальная, образующая угол 0° с осью *a*; диагональная — под углом 26 и 44° к оси *a*. Эти направления в соответствующем порядке полностью совпадают с направлениями и порядком уменьшения плотности заполнения рядов атомами Al.

Порядок степени убывания ретикулярной плотности в рядах не соответствует порядку степени распространения штриховки определенных направлений.

Из всего изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Колебательная штриховка есть результат послыоного тангенциального анизотропного роста в плоскости $(1\bar{0}10)$ в направлении удлинения штриховки, которое, как правило, совпадает с направлением наиболее плотно заполненных атомами Al рядов в той же плоскости структуры берилла.

2. Колебательная штриховка образуется в результате притока вещества к грани и зарождения центров новых слоев вдоль определенных линий — «активных рядов», чередующихся с параллельными им «неактивными рядами», вдоль которых нет притока вещества и образования новых слоев. Направления этих рядов тоже, как правило, совпадают с направлениями наиболее плотно заполненных атомами Al рядов в плоскости $(1\bar{0}10)$ структуры берилла.

Нами получены новые дополнительные наблюдения, указывающие на стремление к совпадению направлений протяжения штрихов с направлениями наиболее плотно заполненных атомами Al рядов в плоскости $(1\bar{0}10)$ структуры берилла. Это позволяет связывать выделенные нами «активные ряды», вдоль которых идет преимущественное образование центров новых слоев на растущих гранях кристаллов, с рядами или группами параллельных рядов, характеризующихся наиболее плотным заполнением однотипными атомами и находящимися под другим энергетическим (электрическим) потенциалом по сравнению с соседними участками поверхности кристалла. В результате новые центры слоев возникают преимущественно на месте этих «активных рядов». Приходится принять, что «активные ряды» меняют свое место в процессе роста кристалла, так как иначе штриховка была бы слишком глубокой и место положения штрихов на грани было бы постоянным, чего не наблюдается в действительности. Вопрос о возникновении «активных рядов» пока еще неясен.

Наблюдаемое нами стремление к образованию новых слоев на плоских поверхностях граней, чаще всего на верхних поверхностях штрихов-выступов, вместо, казалось бы, энергетически более выгодного зарастания многочисленных готовых слоев противоречит лежащим в основе современной молекулярно-кинетической теории роста кристаллов теоретическим положениям Косселя и Странского. Согласно этой теории, в ионных кристаллах приток вещества и зарождение новых слоев выгоднее и чаще всего осуществляется у вершин и ребер и лишь в последнюю очередь на плоской грани (Кузнецов, 1953). Однако необходимо учитывать, что берилл не является чисто ионным соединением.

Н. Н. Шефталъ (1947) видит в дефектах на гранях возможную причину образования аксессуарий роста в середине граней. По-видимому, это положение не применимо к комбинационной штриховке, если учесть опыты Д. Б. Гогоберидзе (1948), и не позволяет связывать предполагаемые нами «активные ряды» с рядами структурных дефектов.

Возможно, «активные ряды» возникают в результате избирательного захвата примесей отдельными участками граней, что в свою очередь требует объяснения. Не исключено, что на возникновение «активных рядов» оказывает воздействие неоднородность электрического поля и концентрационных потоков, образующихся вокруг кристалла в процессе кристаллизации. Во всяком случае, все эти вопросы требуют своего дальнейшего разрешения путем детальных микроскопических исследований природы колебательной штриховки и проведения экспериментальных работ по ее получению.

Сложный грани́ый рельеф, образованный послойным ростом, штрихами-выступами и дендритным ростом

На некоторых кристаллах берилла на грани $(10\bar{1}0)$ пегматитов наблюдался сложный рельеф, который нельзя было объяснить отдельно только послойным ростом или ростом штрихов-выступов.

Рост штрихами-выступами и послойный рост в них тесно переплетался (табл. XIX, а, б, в).

Местами наблюдаются хорошо выраженные террасы и плато, выросшие из фигур роста шестиугольной, ромбовидной формы (табл. XIX, г), но в отдельных участках они переходят в штрихи-выступы, часто отклоняющиеся от своих основных направлений и разветвляющиеся в плоскости грани. Местами это разветвление штрихов-выступов с тенденцией к распространению ветвей вдоль основных направлений колебательной штриховки сходно с дендритным ростом в плоскости тонкого слоя (табл. XIX, д, е).

На табл. XX, а отчетливо видно, что отложение вещества на грани кристалла берилла осуществляется в виде штрихов-выступов, соединяющихся между собой и соединяющих участки сплошного плоского слоя. Поверхность сплошного плоского слоя и штрихов-выступов и всех переходных типов скульптур между ними, напоминающих иероглифы, лежит на одном уровне.

Тангенциальное разрастание штрихов-выступов и слияние их приводит к образованию сплошного плоского слоя. Не очень резко, но заметно выражена преимущественная ориентация пучков штрихов-выступов и широких полос сплошного плоского слоя вдоль оси C кристаллов берилла, угловатая форма штрихов-выступов с переходом к правильным фигурам роста, характерным для грани $(10\bar{1}0)$. Местами наблюдаются переходы к дендритному росту штрихов-выступов.

Все приведенные факты говорят о том, что отложение вещества берилла на грани можно представить как эпитактический рост независимого большого числа кристаллических образований в тонком слое на подложке, имеющей тот же состав и структуру, что и отлагающееся вещество. Во всех случаях центр роста начинается с образования фигуры роста или группы их с тенденцией к выстраиванию в линию и к слиянию с образованием штриха-выступа или дендрита. Влияние подложки заставляет тангенциально разрастающиеся образования закономерно ориентироваться. Отступления от закономерной ориентировки, а также неравномерность отложения вещества на площади грани можно объяснить тепловыми флюктуациями раствора близ поверхности кристалла и разным энергетическим потенциалом структурных рядов, полей в плоскости грани.

Природа вицинальных образований

Вицинали не так широко распространены на гранях кристаллов берилла, как четко выраженные плоские слои роста, штрихи-выступы и связанные с ними скульптуры.

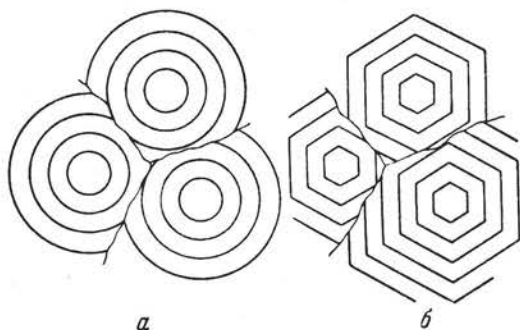
Однако на некоторых кристаллах они развиты. Причем если они развиты, то другие скульптуры роста на рассматриваемой грани имеют подчиненное значение. На гранях (0001) вицинали развиты чаще, чем на $(10\bar{1}0)$.

Наиболее часто вицинали представлены пирамидами роста, имеющими очень пологие скаты — плоские, но чаще криволинейные. Заметить вицинали можно легче всего при косом освещении под острым углом к поверхности.

Формы вицинальных пирамид в грубом приближении соответствуют форме единичных фигур роста, развитых на соответствующей грани.

На грани (0001) наблюдаются вицинали гексагональной формы, на грани $(10\bar{1}0)$ — гексагональной, ромбической формы. Встречаются вицинали овальной и неправильной формы в основании (табл. XX, б, в, г).

Все материалы микроскопического исследования доказывают, что вицинали являются частным случаем зарождения и роста на грани единичных фигур роста, но в специфических условиях. Главное отличие вицинальных пирамид и фигур роста в том, что грани первых не имеют простых символов и чаще всего криволинейны.



Фиг. 24. Взаимодействие между собой сферолитов (а) и вициналей (б) в плоском слое

При детальном исследовании рельефа на одноименных гранях на различных их участках и на разных кристаллах из одного и того же месторождения можно проследить все постепенные переходы от фигур роста к вициналам. При больших увеличениях с применением различных методов повышения контраста вскрывается ступенчатая природа иррациональных плоских и криволинейных граней вициналей (табл. XXI, а, б, в). Элементы рельефа этих ступеней (ребра, грани) те же, что и у фигур роста.

Некоторые вицинали имеют, так же как и скульптуры роста, связанные с фигурами роста генетически, асимметричное строение (табл. XXI, г, д).

Так же как и фигуры роста, отдельные вицинальные пирамиды могут участвовать в построении штрихов-выступов (табл. XXI, е).

Образование штрихов-выступов из вициналей, так же как и из фигур роста, характерно для граней с ярко выраженной анизотропией — граней призматического пояса.

На более изотропной грани (0001) при отсутствии зональности, так же как и фигуры роста, вицинали располагаются беспорядочно, но в общем равномерно.

Характер разрастания отдельных вициналей в плоскости грани таков, что между их основаниями образуются извилистые границы, несмотря на секториальное построение каждой вицинали (табл. XXII, а, б). По-видимому, характер разрастания вициналей в плоскости грани аналогичен характеру разрастания сферолитов и при встрече их действуют те же закономерности секториального построения (геометрический отбор, например).

Отличие заключается в том, что рост сферолитов изотропен, а рост вициналей подчиняется симметрии грани (фиг. 24).

Как и в других кристаллах, в берилле наблюдаются дислокации. При несогласном срастании блоков, волокон в кристаллах берилла наблюдаются дислокации, проявляющиеся микроскопически в остановке, искривлении, смещении элементов гранного микрорельефа (табл. XXII, *в*).

Винтовые дислокации для берилла мало характерны. При тщательном осмотре под микроскопом нескольких тысяч кристаллов было обнаружено всего несколько кристаллов, на которых хорошо развит дислокационно-спиральный рост. Ярким примером является кристалл из одного альбитизированного пегматита. На гранях $\{10\bar{1}0\}$ этого кристалла наблюдалось несколько винтовых дислокаций, занимающих почти всю грань.

Смещение вдоль винтовой оси очень большое, достигающее 0,01 мм. Морфология скульптур, образованных спиральным ростом, в данном случае мало отличается от скульптур, образующихся при разрастании обычных фигур роста (табл. XXII, *г, д*). Ориентировка элементов рельефа (ребер, граней), несмотря на слабую криволинейность, грубо подобна таковой в скульптурах, выросших из фигур роста.

Благодаря искривлению структурной поверхности грани в результате дислокаций новые нормальные скульптуры роста, образующиеся на грани около ребер, разрастаясь к центру грани, образуют чешуйчатый рельеф (табл. XXII, *г*; табл. XXIII, *а*). В данном примере слоистость при плоском характере слоев и почти правильная ромбическая морфология скульптур, образованных спиральным ростом, выступают отчетливо. Наблюдались спирали, образующие вичинальные пирамиды с криволинейной поверхностью отдельных ступеней и криволинейной формой, очень далекой от ромбической формы и напоминающей эллипс (табл. XXIII, *б*). Однако ориентировка большой и малой диагоналей при этом сохраняется.

Спиральнослоистый рост может захватывать всю грань при небольшом числе центров спирального роста. Края слоев спиралями слабо изломаны с приближением к формам фигур роста на грани и концентричны (табл. XXIII, *в*). При встрече двух спиралей их слои переплетаются и заходят друг за друга или спиральность исчезает, и вершина пирамиды со спиральным строением слоев в основании имеет в верхней части нормальное отложение слоев и плоскую вершину (табл. XXIII, *г*). Наблюдается переплетение нескольких спиралей, исходящих из одного центра (табл. XXIII, *д*).

На гранях (0001) других кристаллов дислокации вызывали спиральное разрастание из одной области большого количества тонких слоев (толщиной около 10 мк) (табл. XXIII, *е*).

На одном из кристаллов на грани (1010) наблюдались скульптуры, внешне напоминающие те, которые наблюдал Гриффин (Griffin, 1950) и отождествил со спиралями,— так называемые бритвенные лезвия (табл. XXIV, *а*). При внимательном исследовании оказалось, что эти скульптуры, представляющие большие пирамиды — промежуточные между вичинальными и обычными скульптурами роста правильной формы, ничего общего со спиральным ростом не имеют.

Микрорельеф скелетного роста

Кристаллы берилла, выросшие в полости, заполненной рыхлым или вязким материалом, приобретают скелетное строение. Они становятся плохо ограниченными, имеют на своей поверхности множество выступов и дополнительных граней. Однако по одинаковой ориентировке всех

скульптурных элементов, принадлежащих этим образованиям неправильной формы, можно установить, что мы имеем дело с монокристаллом.

В микрорельефе скелетных кристаллов преобладают выступы, чаще всего правильной геометрической формы, подчиняющейся симметрии грани, на которой они развиты. Но нередки и отступления в контурах выступов от идеально правильной формы. Верхние плоскости выступов, как правило, параллельны грани, на которой они развиты. Глубина рельефа может быть значительной: нередко она достигает нескольких миллиметров, а на больших кристаллах — более 1 см. Характерны гребенчатые выступы, осложняющие штрихи-выступы на гранях, также игольчатые многочисленные выступы на вершинах кристаллов. На табл. XXIV, б, в показаны характерные примеры микрорельефа скелетного роста.

Микрорельеф метасоматического роста

Микрорельеф метасоматического роста под микроскопом четко отличается от микрорельефа свободного роста. То, что это рельеф роста, а не растворения, доказывается сходством мельчайших геометрических элементов рельефа с таковыми для рельефа свободного роста. Слияние и взаимодействие этих микроэлементов таково, что уже в малом масштабе образуются характерные ломаные контуры микроскульптур. Характерной особенностью их является многоступенчатость и односторонняя ступенчатость слоев. Однако как бы ни были неправильны и ломаны контуры ступеней, поверхность всех слоев строго плоская и параллельная грани, на которой они развиты. На табл. XXIV, г, д и табл. XXV, а показаны характерные примеры микрорельефа метасоматического роста.

Все характерные формы скульптур метасоматического роста и их ориентировки грубо подобны формам скульптур свободного роста (табл. XXV, б, в).

Более крупные скульптуры метасоматического роста также грубо подобны таковым при свободном росте. Однако контуры их много ступенчаты и изломаны (табл. XXV, г, д, е).

Микрорельеф метасоматического роста по сравнению с микрорельефом свободного роста более расчленен. Глубина рельефа по отношению к размерам характерных скульптур в 2—3 раза больше, чем при свободном росте. Способы образования рельефа, образования и разрастания слоев остаются теми же, как и при свободном росте, но на них накладывается влияние стесненности условий роста. Наиболее «сильные» элементы микрорельефа — ребра, фигуры роста, штрихи-выступы — наиболее интенсивно растут, особенно в ослабленных трещиноватых или легче растворяемых участках структуры породы, в которой метасоматически растет берилл. В мелкозернистых, однородных по структуре и составу породах микрорельеф роста на кристаллах берилла менее расчленен, чем в крупнозернистых и неоднородных породах.

Микрорельеф совместного роста в полости

При росте в полости минералы, постепенно заполняя пространство полости и соприкасаясь друг с другом, оставляют один на другом отпечатки совместного роста. При разборе макроморфологии бериллов, растущих в полости в стесненных условиях, говорилось, что при совместном росте возникает индукционный рельеф.

Крупные формы микрорельефа определяются морфологией кристаллов, оставляющих отпечатки (табл. XXVI, а, б, в).

Микрорельеф поверхности отпечатков выражен в виде штриховки. Такую штриховку обычно называют индукционной, наведенной (Ферсман, 1952). В микрорельефе, образованном индукционной штриховкой совместного роста, преобладают реберные формы, ориентированные как и при микрорельефе свободного роста кристаллов берилла. Однако некоторые реберные формы, особенно те, которые подчеркивают основные контуры отпечатка, ориентированы произвольно по отношению к элементам структуры кристалла, на котором оставлены отпечатки. Примеры микрорельефа, обусловленного индукционной штриховкой, показаны на табл. XXVI, *г* и табл. XXVII, *а, б*.

Таким образом, микрорельеф совместного роста на поверхности отпечатка образован реберными формами обоих соприкасающихся кристаллов. Ребра выступают и при совместном росте вдаются в соседний кристалл постольку, поскольку эти элементы рельефа имеют наибольшую кристаллизационную силу. Плоскости слоев роста ведут себя более пассивно. Однако и среди последних в основном преобладают те, которые параллельны наиболее плотно заполненным граням соприкасающихся кристаллов.

По реберным и плоскостным формам, развитым на отпечатке кристалла, который отсутствует, можно определить иногда сингонию, ориентировку и даже вид этого кристалла.

В микрорельефе совместного роста иногда заметны элементы метасоматического роста, особенно тогда, когда соприкасающиеся с бериллом минералы легко перекристаллизуются под влиянием давления (фиг. 54*в*). Интерпретация микрорельефа с развитием элементов совместного и метасоматического роста очень сложна и при этом необходимы особенно тщательные всесторонние исследования с учетом всех фактов.

Микрокристалломорфологическое исследование явлений растворения на кристаллах берилла проводилось нами ранее (Фекличев, 1960, 1963). Обобщение этих исследований и новые сведения даны в нашей большой статье (Фекличев, 1963).

Неоднородности и изменения во внутреннем строении берилла

Оптические аномалии и оптические неоднородности о зональных кристаллах берилла

Из детальных исследований оптических аномалий в бериллах, проведенных многими исследователями, выяснилось, что оптические аномалии и зональность очень характерны для кристаллов берилла.

Пфаф (Pfaff, 1865) впервые обнаружил оптическую аномалию берилла. В шлифах, вырезанных перпендикулярно оптической оси, было видно, что центральная часть кристаллов одноосна, а края двуосны. В скрещенных николях наблюдается волнистое неодновременное угасание отдельных частей кристалла. Пфаф считал, что берилл является одноосным минералом, а аномалии угла оптических осей рассматривал как явление вторичное, обусловленное некоторыми структурными изменениями.

Маллард (Mallard, 1876) описывает берилл как «псевдогексагональное» вещество. Он считал, что берилл имеет ромбическое строение, но близкое к гексагональному. В центральных частях кристаллов оно переходит в гексагональное. В шлифах наблюдается зональность по погасанию, по углу оптических осей и ориентировке плоскости оптических осей.

Бертранд (Bertrand, 1879) описал строение кристаллов берилла из Мюзю, состоящих из двух частей: центральная часть бесцветная представляет шестиугольную звезду: в каждом луче плоскость оптических осей занимает положение, перпендикулярное стороне гексагонального многоугольника, представляющего сечение кристалла. Внешняя зона имеет зеленый цвет и штриховку, параллельную сторонам гексагонального многоугольника, плоскости оптических осей остаются перпендикулярными сторонам многоугольника.

Граттарола (Grattarola, 1880) описал ростериты и зональные кристаллы берилла с о-ва Эльба. У последних центральная часть представлена бериллом, а внешняя ростеритом. Интересно, что разные края таких кристаллов обнаруживают непостоянство состава. Таблички ростерита в скрещенных николях обнаруживают секторное строение с неодновременным погасанием секторов.

Маделунг (Madelung, 1883) указывал на двуосность берилла из Адун-Чалона.

Вик (Wiik, 1885) в уральских бериллах нашел двуосные зональные и секториальные кристаллы с углом оптических осей от 10 до 20°. Автор считает, что аномалия берилла возникла при охлаждении кристаллов, а при высокой температуре в момент их образования они были одноосными.

А. Н. Карножицкий (1891) исследовал оптически аномальные кристаллы берилла из Ильменских гор и доказал, что под микроскопом они

обнаруживают нежную слоистость, параллельную граням призмы и пирамиды и что плоскости призмы грубо исполосованы параллельно вертикальной оси.

Браунс (Brauns, 1891) в связи с изучением оптических аномалий в кристаллах подверг исследованиям и берилл, у которого обнаружил двуосность на многих кристаллах.

П. В. Еремеев (1898) описал постепенный переход берилла в ростерит.

А. Н. Карножицкий (1898) исследовал аномальные слоистозональные кристаллы берилла из Ильменского заповедника. Было приготовлено два шлифа параллельно базису: один — вблизи вершины кристалла, другой — из средней его части. В первом шлифе обнаруживается зональное строение: центральная часть шлифа почти одноосна, периферическая — двуосная, со слоистым строением и она делится на секторы, в каждом из которых плоскость оптических осей занимает определенное положение. Угол оптических осей равен $4-8^\circ$. В центральном поле деление на секторы заметно очень слабо. Периферическая часть обладает плеохроизмом. Шлиф из середины кристалла показал менее резкую зональность и одноосный характер почти во всех частях, кроме самых периферических и то не со всех сторон гексагонального сечения. Автор подчеркивает связь в распределении оптических аномалий и зональности кристаллов со штриховкой. Он считает, что зональность есть следствие неодинаковых условий роста кристаллов берилла — неодинакового состава растворов, из которых кристаллизовался берилл.

П. А. Замятовский (1900) описывает зональный, секториальный изумруд с концентрическим строением зон. Зональность особенно четко выражена в поляризационном микроскопе в изотропном сечении, которое в данном случае обнаруживает ясную анизотропию. В аппарате Гротта у изумруда найдена двуосность. Причину аномалий автор видит во внутренних натяжениях в структуре берилла.

Драверт (1904) описал зональные кристаллы, состоящие из зон берилла и изумруда.

Дюпарк и др. (Duparc, Wunder, Sabot, 1910) для аквамаринов из пегматитов на о-ве Мадагаскар определили для некоторых месторождений угол оптических осей ($2E = 9^\circ 44'$; $10^\circ 12'$; $5^\circ 23'$; $8^\circ 42'$).

А. Е. Ферсман (1920) в своей монографии о драгоценных и цветных камнях отчетливо выделял два типа цветной зонарной окраски бериллов: концентрическую, хорошо заметную в разрезах параллельно базису и меняющуюся в длину по вертикальной оси, иногда столь резкую, что кристаллы золотистого берилла начинают напоминать полихромный турмалин.

Бернауер (Bernauer, 1926) специально исследовал оптические аномалии изумрудов из Мюз, в которых они тесно связаны с зональным, секториальным строением кристаллов. $2E$ составлял $0-8^\circ$, реже — 15° . В отличие от больших кристаллов изумруда, окрашенных хромом, мелкие кристаллики, окрашенные ванадием, показали обычную структуру, без оптических аномалий.

Бауер-Шлосмахер (Bauer-Schlossmacher, 1932) указывает на то, что меняющееся распределение окраски в виде слоев, параллельных базису, встречается в группе берилла лишь изредка. В изумрудах по его наблюдениям, встречаются зонарные полосы с решетчатой структурой и пятнистыми полями и иногда обнаруживается волнистое и решетчатое погасание, двуосность.

Н. Ю. Икорникова (1939) отмечала оптические аномалии бериллов, когда $2V$ достигал $15^\circ 30' - 17^\circ 10'$.

Харбут и Венден (Harbut and Wenden, 1951) подробно изучили зональный берилл с рудника Маунт Майка. Кристалл берилла от зоны к зоне меняет состав и оптические свойства.

А. К. Винчелл и Г. Винчелл (1953) указывают, что в случае обнаружения двуосности в бериллах (причем $2E$ редко больше 10°) в таких кристаллах гексагональные формы являются результатом двойникования трех- или шестиромбических неделимых, как у арагонита. В поперечном разрезе центральные части таких двойников могут быть одноосными.

К. К. Матвеев (1955) провел детальное исследование строения поперечно-полосатых кристаллов берилла. В результате он пришел к выводу, что для них характерно тонковолокнистое сложение. Тонкие волокна образуют гипопараллельные сростки параллельно вертикальной оси. Поперечная слоистость вызвана прерывистым ростом вдоль вертикальной оси.

На двуосность мелких кристалликов берилла из пегматитов указывает Дейв (Dave, 1955).

Эплером (Erppler, 1961) изучены следы роста в изумруде. К ним, в частности, относятся прерывистые слои роста, выраженные в чередовании слоев разной окраски, характеризующих колебания в составе материнского раствора. Совершенно бесцветные слои могут чередоваться с густо окрашенными. В одних кристаллах слои роста параллельны грани (0001), в других — граням крутых гексагональных пирамид.

Из приведенного обзора следует, что оптические аномалии тесно связаны с неоднородностями кристаллического строения берилла, с зональностью состава и строения, а следовательно, и с оптическими неоднородностями и зональностью.

Особенности распределения зон и оптических неоднородностей в бериллах

Зональность и оптические неоднородности берилла имеют различное происхождение и особенности распределения в кристаллах. Всякое изменение оптических свойств (показателя преломления, двупреломления, цвета, осности) в пределах монокристалла может рассматриваться как оптическая неоднородность.

Оптическая неоднородность и зональность бывают разного типа. Иногда она бывает заметна невооруженным глазом в крупных кристаллах берилла. Эта неоднородность выражается в зональном и участковом распределении цвета. При знакомстве с богатыми фондами Минералогического музея АН СССР нам удалось наблюдать интересные примеры цветовой зональности в кристаллах берилла.

Пример 1. Длиннопризматические кристаллы с поперечной цветовой зональностью. Зоны пересекают кристалл от края до края и параллельны (0001). Наблюдаются бесцветные зоны, желтые, бурые, буро-оранжевые. Переходы между зонами резкие или постепенные (табл. XXVIII, а). Такая цветовая зональность могла возникнуть при пульсирующем изменении содержания хромофора или его активности в растворе при росте берилла только вдоль оси C .

Пример 2. Зональные кристаллы берилла — изумруда. Кристаллы не имеют четкой гексагональной огранки. Внутренняя часть кристаллов содержит включения породы (футлярная форма). Прилегающие к центру участки берилла белого цвета. К периферии берилл все сильнее окрашивается в зеленый цвет и переходит в зону изумруда с поверхности (табл. XXVIII, б). Такая цветовая зональность возникла в результате изменения режима метасоматической кристаллизации берилла в породе.

Пример 3. Крупный кристалл бесцветного берилла. Параллельно (0001) наблюдается резкая поперечная зона голубого цвета (табл. XXVIII, в). Происхождение цветовой зональности аналогично таковому в примере 1.

Пример 4. Призматический кристалл берилла зеленого цвета в основании. Развиты только формы $\{0001\}$ и $\{10\bar{1}0\}$. Вершина кристалла бесцветная. Через бесцветную зону просвечивает пирамидальная головка зеленой зоны берилла. Границы между зеленой и бесцветной зонами берилла резкие (фиг. 25). Первоначально кристалл рос окрашенным и имел формы призмы и дипирамиды. При резком изменении режима кристаллизации берилл дорастал с вершины, причем форма дипирамиды исчезла и остались только формы призмы и пинакоида.

Пример 5. Крупный кристалл берилла из альбитизированного пегматита. В сечении, параллельном (0001), обнаруживается зональность по цвету. Внешняя зона кристалла светлая, желтовато-белая. Внутри заключено ядро светло-голубого цвета. Граница между двумя зонами не очень резкая и извилистая, хотя переход от одного цвета к другому осуществляется довольно быстро. Такая цветовая неоднородность могла возникнуть при метасоматическом росте берилла.

Пример 6. Параллельностолбчатые крупнокристаллические выделения непрозрачного берилла с неоднородной пятнистой окраской, меняющейся в участках от белой, светло-розовой, желтоватой до розовой. Границы между цветными зонами извилистые, произвольно расположенные. Отдельные зоны пересекают несколько монокристаллов. Местами наблюдаются пустоты. Края их являются мелкими гранями берилла. Берилл в этих местах бесцветный, прозрачный. Бесцветные участки берилла как бы нарастают на окрашенные участки. Выделения крупнокристаллического пятнистого берилла образовались в замещенных пегматитах. Прозрачный берилл образовался при перекристаллизации, когда происходила очистка берилла от примесей хромофоров.

Оптическая неоднородность по цвету под микроскопом в пластинках берилла наблюдается редко, так как бериллы редко сильно окрашены. Окраска берилла наблюдается только в утолщенных прозрачных шлифах.

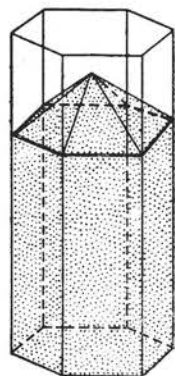
Микроскопически выявляется неоднородность в светопреломлении берилла. Так же как и цветовая зональность и неоднородность, первая помогает выяснить условия кристаллизации берилла.

В некоторых длиннопризматических бериллах из гидротермально-пневматолитовых месторождений наблюдается поперечная зональность, выраженная в чередовании большого числа зон, параллельных (0001) и отличающихся по показателю преломления. Это выражается в изменении рельефа при диафрагмировании освещения (табл. XXVIII, *з*). Отсутствие зональности, параллельной граням призмы, говорит о том, что кристаллы росли только вдоль оси *C*.

В других кристаллах наблюдается концентрическая зональность (табл. XXVIII, *д*), говорящая о росте кристалла во все стороны.

Оптические аномалии берилла проще всего наблюдать в сечении, параллельном (0001), т. е. в изотропном сечении. У некоторых кристаллов берилла в этих сечениях можно наблюдать участки с натяжениями в структуре, приводящими к просветлению в скрещенных николях (табл. XXIX, *а*). Эти натяжения приурочены к мельчайшим дефектам в структуре, чаще всего механическим примесям — частицам посторонних минералов, вросших в берилл и обладающих другим, чем берилл, температурным расширением.

Возникновение дуосности и просветление отдельных зон в изотропном сечении берилла в скрещенных николях наблюдаются в участках,



Фиг. 25. Дорастание зеленого кристалла берилла прозрачным бериллом с вершины

где проявляется зональность по величине светопреломления (табл. XXIX, б).

В крупных кристаллах берилла, образующихся метасоматическим путем в породе и имеющих неоднородное строение в результате неравномерного и неодинакового поступления питающего материала, оптические аномалии широко проявлены. У таких кристаллов в изотропном сечении редко можно увидеть полное погасание. Чаще наблюдается пятнистость, напоминающая пертиты замещения в полевых шпатах (табл. XXIX, в).

Правильное распределение оптически аномальных зон наблюдается чаще в сводно выросших кристаллах берилла, а пятнистое распределение оптических аномалий характерно для метасоматических бериллов и является ценным признаком при выяснении их происхождения.

Изменение внутреннего строения берилла при энергетических и химических воздействиях

Изменения физических свойств берилла при энергетических воздействиях

Уже давно было замечено, что бериллы меняют свои оптические свойства в результате физико-химических воздействий.

Маллард (Mallard, 1882) исследовал изменение оптических свойств аномального берилла. Судя по усилению интерференционной окраски при нагревании, в процессе повышения температуры у берилла повышалось двупреломление. При снижении температуры интерференционные окраски становились прежними.

Герман (Herzmann, 1908) нашел, что голубовато-зеленый берилл при нагревании становится серым.

Дёльтер (Doelter, 1915) пишет об изменении цвета берилла в результате действия радиоактивного излучения.

И. Курбатов и В. Каргин (1927) подвергали термической обработке зеленый берилл с Шерловогорского месторождения. При температуре 450—500° у них довольно быстро происходило изменение зеленого цвета в голубой. Опыты производились в муфельной печи при очень медленном подъеме температуры. При разных температурах время выдерживания образцов для изменения окраски было различным. При температуре 425° время выдерживания в печи равно 1 часу. Изменение окраски происходит независимо от того, находится ли кристалл в жидкой или газообразной среде. Химический анализ не обнаружил ни одного элемента, кроме Fe, которые бы могли обусловить окраску образцов. Отсюда авторы делают вывод, что изменение зеленой окраски в голубую, вероятно, связано с иным физическим состоянием атомов железа в берилле при высоких температурах. Авторы считают, что температурное изменение окраски берилла является возможной причиной существования разноокрашенных (зеленых и голубых) бериллов в природе.

Шмидт и Байер (Schmidt and Baier, 1928) нашли, что двупреломление берилла при нагревании от 0 до 1100° постепенно увеличивается, а цвет меняется от желтого до зеленовато-голубого.

Н. Дилакторский (1931) изучил изменение оптических свойств бериллов при высоких температурах. Нагревание производилось до 1500° в фарфоровых и платиновых тиглях.

Образцы выдерживались при максимальной температуре от 15 до 60 часов. «Изменение окраски при нагревании происходит следующим путем: сначала минерал светлеет, теряет прозрачность сразу по всей массе или отдельными участками. Постепенно помутнение увеличивается, зеленый цвет приобретает молочный оттенок, иногда замечается

перламутровый блеск, и наконец при температурах, близких к плавлению, минерал почти совершенно белеет».

Кланг (Klang, 1924) наблюдал переход зеленой и желтой окраски в голубую при нагревании. При этом замечаются изменения в спектре поглощения.

Тщательное исследование изменения природы окраски голубых, зеленых и желтых бериллов при нагревании проведено Яраманом (Jaraman, 1940). Образцы бериллов разного цвета (I—густо-голубой, II—бледно-голубой, III—яблочно-зеленый, IV—зеленовато-желтый, V—бесцветный) нагревались в течение 5 часов до 500° С и сравнивались содержание Fe_2O_3 и FeO в ненагретых и нагретых образцах (табл. 31).

Таблица 31

Содержание Fe_2O_3 и FeO в бериллах до и после нагревания, по Яраману

Образцы	Fe_2O_3		FeO	
	до нагревания	после нагревания	до нагревания	после нагревания
I	1,25	1,37	0,35	0,27
II	1,09	1,20	0,34	0,24
III	0,43	1,75	1,46	0,49
IV	0,73	1,79	1,24	0,42
V	0,17	—	0,39	—

Зеленые образцы меняли цвет на голубой. Автор сделал вывод, что голубой цвет берилла обусловлен Fe_2O_3 , зеленый — FeO.

Б. О. Гаврусевич и Ф. Я. Сарапулов (1941) проследили смену цвета, прозрачности, показателей преломления при нагревании различных бериллов из пегматитов. Авторы подчеркивают, что аквамарин теряет свой цвет при нагревании, а изумруд — нет.

В 1946 г. С. А. Боровик показал, что в результате длительного выдерживания берилла в растворе соли скандия кристаллы берилла окрашиваются в синий цвет. Он считает, что аквамарины также окрашены скандием.

Поух и Рогерс (Pough and Rogers, 1947) провели интересное исследование по облучению рентгеновскими лучами образцов самоцветов, в том числе бериллов. Для облучения использовались рентгеновская трубка на 50 кв. Окно в трубке из бериллия 1 мм толщиной. Образцы во время облучения находились на расстоянии 0,5 см от окна. Исследованию подвергались четыре образца берилла. В результате облучения они меняли свой цвет. Результаты сведены в табл. 32.

Таблица 32

Изменение окраски берилла при облучении

Разновидность	Обычная окраска	Окраска после радиации	Время эксперимента	Фосфоресценция и примечания
Аквамарин	Бледно-голубой	Светло-зеленый	41 час	Нет
Берилл	Белый	Бледно-коричневый	16 часов	Нет
Изумруд	Зеленый	Зеленый	1 час	Нет. Без изменений
Марганит	Розовый	Грязно-розовый	1 час	Нет. Восстанавливает цвет в результате нагревания

Мукхерджи (Mukherjee, 1951) обнаружил, что при длительном облучении рентгеновскими лучами бледно-синего берилла последний приобретает зеленый цвет, а у бесцветного берилла появляется бледно-коричневый цвет.

Фрондел (Frondel, 1952) изучил процессы изменения окраски берилла при изменении температуры. Желтый берилл при повышении окраски становился бесцветным, желто-зеленый становился сначала зеленым, а затем голубым. Наиболее яркая голубая окраска наблюдалась при 400—500°. При 1025° большинство образцов становились белыми и мутными.

Виноградов Г. Ф. (1956) проследил изменение оптических свойств бериллов из пневматолитовых месторождений при нагревании. Бериллы при нагревании становятся непрозрачными и меняют свою окраску с зеленой на голубую уже при 600°, а при 1000° бериллы становятся белыми. Изменение показателей преломления и двупреломления видно в табл. 33.

Таблица 33

Изменение оптических свойств берилла при нагревании

<i>N</i>	20°	400°	600°	800°	1000°	1200°
<i>N_g</i>	1,575	1,573	1,571	1,566	1,561	1,558
<i>N_p</i>	1,568	1,566	1,565	1,566	1,556	1,554
<i>N_g — N_p</i>	0,007	0,007	0,006	0,006	0,005	0,004

Павловић и Николић (1960) изучили свойства нагретого до различной температуры берилла. Наблюдалось постепенное уменьшение показателей преломления и удельного веса. Так, нагретый до температуры 1200° берилл имел показатели преломления: *N_o* — 1,559, *N_e* — 1,554, уд. вес *d* — 2,65. Первоначальные константы у ненагретого берилла соответственно: *N_o* — 1,579, *N_e* — 1,574, *d* — 2,70.

Перекристаллизация и замещение берилла

Берилл из-за плохой растворимости в агрессивных средах относительно устойчив к процессам изменения. Однако и для него можно отметить явления перекристаллизации. А. А. Беусом (1960) приводится фотография перекристаллизованного берилла — «реликт кристалла бесщелочного берилла в ядре кристалла натриевого берилла (оси «С» кристаллов примерно перпендикулярны)».

Можно еще привести перекристаллизацию непрозрачных розовых бериллов в виде параллельно столбчатых агрегатов из литиевых пегматитов Сибири в прозрачные бесцветные пластинчатые кристаллы. Перекристаллизация в данном случае осуществляется часто без изменения ориентировки не полностью растворившихся первичных кристаллов берилла. Одновременно с перекристаллизацией здесь происходит кристаллизация, dorostание массы берилла.

Л. П. Чернышкова (1957) считает, что в занорышах шлировидных пегматитов среди гранитов возможна регенерация кристаллов берилла.

Большой интерес представляют явления катионного обмена в структуре берилла, приводящие к постепенному изменению его свойств. Керр (Kerr, 1946) описал гидротермальные псевдоморфозы полного или частичного замещения по цезийсодержащему бериллу, в состав которых в существенном количестве входил каолинит. При изменении

берилла наблюдалось постепенное изменение его химического состава и оптических свойств (табл. 34).

А. П. Винчелл и Г. Винчелл (1953) также пишут о том, что «берилл довольно легко переходит в каолин; изменение начинается по трещинам, и минерал становится мягким и непрозрачным». На основании исследований Керра можно сделать вывод, что в первоначальную стадию каолинизации не происходит существенных структурных изменений берилла: пока значительная часть берилла и щелочей не заместится водой (по-видимому, в виде иона оксония), происходит лишь катионный обмен.

В некоторых щелочных бериллах в природных условиях распространен катионный обмен, выраженный в изменении окраски берилла. Для агрегатов кристаллов берилла характерна пятнистая окраска — белая, розовая, желтоватая, иногда белая и голубая. При этом пятно одной окраски может захватывать участки нескольких рядом расположенных кристаллов. Границы, отделяющие зоны разного цвета, могут пересекать кристаллы в произвольных направлениях.

Замещение берилла другими минералами отмечалось неоднократно еще в старых работах прошлого века. Более детальные исследования этого вопроса были проведены позднее.

Махачки (Machaschki, 1926) описал берилл и продукты его изменения из месторождения Писек. В качестве продукта изменения берилла обнаружена смесь мусковита, берилла, бертрандита, кварца и полевого шпата. В табл. 35 дано сравнение химического состава двух бериллов (I, II) и продуктов его замещения (III).

Шаллер и Файрчилд (Schaller, Fairchild, 1932) описали замещение щелочного берилла бавенитом вдоль трещин и полостей внутренней части кристалла.

Замещение берилла бертрандитом вместе со слюдой отмечено Е. В. Кузнецовой (1931) и С. С. Курбатовым (1935).

А. Е. Ферсман (1940) отмечает, что в гранитных пегматитах в фазе D и после нее берилл подвергается растворению и замещению

Таблица 34

Изменение химического состава и оптических свойств берилла при его псевдоморфизации (по Керру, 1946)

Состав и свойства	Свежий берилл	Измененный берилл
SiO ₂	69,90	59,55
Al ₂ O ₃	18,88	25,51
Fe ₂ O ₃	0,18	0,90
FeO	0,00	0,05
MgO	0,00	0,15
CaO	0,00	0,01
Na ₂ O	0,01	0,28
K ₂ O	0,40	0,42
H ₂ O ⁺	2,15	5,44
H ₂ O ⁻	0,03	0,31
TiO ₂	0,02	0,13
P ₂ O ₅	0,02	0,09
Li ₂ O	1,00	0,05
Cs ₂ O	2,18	0,05
BeO	11,00	8,01
Сумма	99,77	99,95
<i>No</i>	1,590	1,576
<i>Ne</i>	1,581	1,568
<i>No — Ne</i>	0,009	0,008

Таблица 35

Химические анализы бериллов и продуктов их замещения *

Образцы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	BeO	MgO	CaO	H ₂ O ⁻	H ₂ O ⁺	Σ
I	65,72	18,48	0,20	0,40	12,90	0,21	1,02	0,11	0,89	99,93
II	66,35	18,30	0,09	0,47	12,74	0,16	0,82	0,13	0,51	99,57
III	52,96	17,13	1,23	0,24	16,06	0,09	0,63	0,39	3,76	100,19

* I также 0,37% хлоридов K, Na; III—2,80% Na₂O; 4,90% K₂O.

другими минералами — берtrandитом, фенакитом, флюоритом, жильбертитом (флюорит образуется при действии кислых фтористых растворов, жильбертит — при действии щелочных растворов).

Фемистер (Phemister, 1940) описывает следующие псевдоморфозы по бериллу: хлорит, хлорит+берtrandит, хлорит+кварц. Некоторые бериллы хлоритом замещаются избирательно.

Рамдор (Ramdohr, 1940) описал замещение больших кристаллов берилла в пегматитах фенакитом, берtrandитом и драгоценным прозрачным бериллом.

Согласно Е. И. Кутуковой, в пегматитах скрещения в гидротермальную стадию берилл замещается бавенитом, бериллиевым маргаритом. Земан (Seaman, 1949) отмечает замещение золотистого берилла берtrandитом и кварцем. Согласно Раулиджу и Хейтону (Rowledge, Hayton, 1948), бавенит вместе с кварцем заключен в пустотах среди измененного берилла.

Штрэнд (Strand, 1953) описал псевдоморфозы берtrandита, мусковита и эвклаза по бериллу из пегматитов Норвегии. Образование бавенита вместе с адуляром в пустотах среди берилла в пегматитах отмечает Станек (Stanek, 1954). Черни (Серпу, 1956) отмечает замещение берилла берtrandитом и альбитом, по которым затем развиваются бавенит и минерал, похожий на каолинит. Развитие бавенита по трещинам в берилле отметил Чех (Сеч, 1957). Замещение берилла бавенитом описал Матиас (1959).

Т. И. Тимченко (1959) описала процессы изменения берилла в пегматитах. По ее данным, при гидротермальном изменении берилла образуются: берtrandит, мелкочешуйчатый мусковит, поздний калиевый полевой шпат, фенакит. Последний при замещении берилла сохраняет ориентировку оптической индикатрисы неизменной.

А. А. Беус (1960) считает, что изменение берилла в каолинит может иметь место только в гидротермальных условиях. Согласно А. А. Беусу, берилл в гидротермальных условиях может также замещаться альбитом, фосфатами марганца и железа, кварцем, берtrandитом, мусковитом.

Более подробно необходимо остановится на исследованиях процессов изменения берилла, проведенных М. Е. Яковлевой (1961). В пегматитах натро-литиевого типа белый берилл замещается альбитом, адуляром, берtrandитом, фенакитом, мусковитом и флюоритом. Наиболее широко развито замещение полевыми шпатами, реже берtrandитом, еще реже мусковитом вместе с берtrandитом, или мусковитом вместе с альбитом. М. Е. Яковлева выразила характерные процессы изменения берилла в виде схематичных реакций. Компоненты, освободившиеся при замещении берилла в пустотах образуют новообразования берtrandита, фенакита, бавенита. М. Е. Яковлева считает, что «берилл, входящий в состав пегматитов, сравнительно легко подвергается вторичным изменениям».

И. М. Аверьянова (1962) рассматривала процессы изменения берилла с Кольского полуострова.

Газово-жидкие и твердые включения в кристаллах берилла

Многофазные включения в бериллах были описаны еще в прошлом веке. Брюстер (Brewster, 1848) отмечал в бериллах астеризм, обусловленный ориентированными включениями. Для бериллов из Индии были характерны включения, содержащие газ, две жидкости и твердую фазу. Он отмечал напряжения в структуре берилла, вызванные присутствием

включений. В 1869 г. Сорби и Батлер (Sorby and Butler, 1869) описали многофазные включения в изумруде, а в 1876 г. Ли (Lea, 1876) описал многофазные включения правильной формы в берилле. Мак-Магон (McMahon, 1902) в берилле из Индии обнаружил включения, состоящие из газа, жидкости и твердой фазы.

По Бернауеру (Bernauer, 1926), в секториальных изумрудах из Мюзо включения хиастолита иногда образуют пирамиды роста. Болмен (Bolman, 1940) во включениях в бериллах из Колумбии обнаружил газ, твердую фазу в виде кальцита, жидкость. В некоторых включениях найдена CO_2 .

Ингерсон (Ingerson, 1947) определил для бериллов из Коннектикута и Северной Каролины температуру образования в 155° и 185°C по гомогенизации газово-жидких включений с учетом давления. Скотт (Scott, 1948) определил в берилле начало растрескивания включений в 390° .

Н. П. Ермаков (1950) сомневается в столь низкой температуре кристаллизации берилла, определенной Ингерсоном по первичным включениям.

Н. П. Ермаковым (1950) специально исследовался ход гомогенизации газово-жидких включений в бериллах. Он подчеркивает трудность работы с включениями в берилле. Обычно только 20% опытов являются удачными. Н. П. Ермаков различает два типа гомогенизации первичных включений. При небольшом объеме газового пузырька (до 50%) он при гомогенизации растворялся в жидкости. Включения с высокой концентрацией гомогенизировались при более высокой температуре. При содержании газа более 70% он постепенно растворял в себе жидкость.

Для разных бериллов были получены следующие температуры гомогенизации:

Температура	% газа	Температура	% газа
310	100	438	0
320	100	368	0
398	0	375	0
378	0	349	100
342	0	392	100

В одном случае получилась высокая температура гомогенизации (560°C , 100% газа). Гомогенизация первичных включений в бериллах в газовой фазе, по Н. П. Ермакову, более распространена. В кристаллах аквамарина Н. П. Ермаков отмечает присутствие пяти различных твердых фаз в многофазных первичных включениях: сильвин (растворяется до 75°), шестигранный анизотропный минерал, крупный анизотропный кристалл, рудный минерал, мелкие зеленые кристаллы. При гомогенизации такого включения при 382° в жидкой фазе анизотропные минералы и рудный минерал полностью не растворились.

Твердая фаза, присутствующая во включениях, гомогенизирующих в газовой фазе, представлена сильвином и тремя другими фазами, которые начинают растворяться после 250°C .

Вторичные газово-жидкие включения в бериллах обычно гомогенизировались в жидкой фазе при температуре $125\text{--}142^\circ\text{C}$ (в аквамаринах — $168\text{--}242^\circ\text{C}$), трехфазовые и многофазовые вторичные включения — при температурах $295\text{--}317$ и $366\text{--}412^\circ\text{C}$. Твердая фаза в них представлена мелкими изотропными кристаллами, растворяющимися при температурах 136 и 400°C .

В ходе гомогенизации некоторых первичных и вторичных включений наблюдалась инверсия.

В книге Н. П. Ермакова (1950) приведено 16 микрофотографий разнообразных газовой-жидких включений в берилле. Большинство их имеет трубчатую форму. Представлены первичные и вторичные включения. Соотношение между газовой и жидкой фазой разнообразно. В некоторых включениях наблюдается твердая фаза.

Г. Г. Леммлейн и М. О. Клия (1952) на примере аквамарина пришли к выводу, что резкие колебания в составе включений в залеченной трещине объясняются расшнуровыванием включений при падении температуры. Авторы рекомендуют поэтому наблюдать гомогенизацию не одного, а многих расположенных в одной залеченной трещине включений, а также производить суммарный подсчет объемов фаз во многих включениях. Расшнуровывание включений возможно не только при залечивании трещин.

Камерон, Рау и Вейс (Cameron, Rawey, Weis, 1953) изучили газовой-жидкие включения в бериллах из пегматитов. Выделено три типа включений. Первый тип — рассеянные отрицательные кристаллы и цилиндрические включения, длинная ось которых параллельна удлинению кристаллов. Второй тип — неориентированные округлые, вытянутые или неправильной формы включения. Третий тип — включения разнообразной формы, располагающиеся вдоль неориентированных плоских или кривых поверхностей внутри кристаллов. Включения первого типа — первичны, третьего — вторичны. Состав и соотношение фаз во включениях разнообразно. Наблюдается жидкая и газообразная углекислота, гомогенизирующие до 31°C . Гомогенизация включений с водным раствором осуществлялась в широком диапазоне температур (187 — 386°C).

В берилле из зонального пегматита Вейсом (Weis, 1953) изучены жидкие включения. Температуры гомогенизации включений в берилле лежали в пределах 216 — 515°C . Высокая максимальная температура гомогенизации говорит о большой концентрации раствора во включениях. Об этом говорят и температуры замораживания жидкости во включениях от -3 до -19°C . Достоверные результаты получены только на первичных канальчатых включениях. Интересно, что в двух месторождениях берилл из внутренней зоны пегматита дал температуру гомогенизации ниже, чем берилл из внешней зоны. Для третьего месторождения получился обратный результат.

Для одного из месторождений средние температуры гомогенизации были: для внешней зоны — 313° , для внутренней — 257° . С поправкой на давление температура кристаллизации берилла принимается равной 500° .

А. А. Беус и Н. Е. Залашкова (1956) и А. А. Беус (1960) считают, что для натриевой разновидности берилла характерны ориентированные многофазные включения прямоугольного облика, содержащие кубические кристаллы хлоридов и фторидов щелочных металлов. Указывается, что для бесщелочных модификаций берилла включения подобного рода не характерны.

Эпплер (Eppler, 1958) описал в берилле астеризм, вызванный включениями ильменита.

А. А. Беус (1960) отмечает в бесщелочных бериллах из занорышей пегматитов в мутных зонах кристаллов обилие канальчатых ориентированных вдоль оси *C* трехфазных газовой-жидких с углекислотой включений.

А. А. Беус (1960) отмечает присутствие в бериллах CO_2 , Cl^{-1} , F^{-1} , CO_3^{-2} и SO_4^{-2} , связанных с газовой-жидкими включениями. Он подчеркивает, что систематического изучения особенностей распределения этих примесей не проводилось. А. А. Беус указывает содержание CO_2 и Cl^{-1} в бериллах в количестве сотых долей процента.

Губелином (Gubelin, 1960—1961) в синтетическом изумрудном покрытии на берилле были обнаружены слои роста и линии роста, представленные залеченными трещинами с включениями материнского раствора. Во включениях и на контакте бериллового ядра с оболочкой изумруда наблюдаются игольчатые кристаллы и скелеты эвклаза, фенакита и других минералов.

Двухфазовые воронкообразные включения, ориентированные параллельно направлениям роста вдоль оси *C*, характерны только для синтетического покрытия.

В бразильских аквамаринах в качестве включений был определен петалит, выделенный из аквамарина в чистом виде (Erpler, 1961).

Эпплер (Erpler, 1961) наблюдал в природных кристаллах изумруда произвольно ориентированные осколки берилла, хорошо просматривающиеся в поляризованном свете. Часто осколки располагаются около многофазных газовой-жидких включений. Осколки и включения были законсервированы растущим изумрудом. Трехфазовые включения, имеющие зубцевидные концы, ориентированные параллельно оси *C*, указывают на направление роста изумруда. В трехфазовых включениях в твердой фазе присутствуют кубические кристаллы, ромбовидные кристаллы кальцита, реликты петалита.

Нами (Фекличев, 1962) исследование газовой-жидких и многофазных включений в бериллах проведено на зональных кристаллах из занорыша в пегматите.

Закономерности в морфологии газовой-жидких включений в кристаллах берилла

Основные закономерности в морфологии газовой-жидких включений в кристаллах вскрыты благодаря экспериментальным и теоретическим работам Н. В. Шубникова (1947), Г. Г. Леммлейна (1950, 1951, 1953, Laemmlein, 1929), М. О. Клия (1952) (см. также их совместные работы: Леммлейн и Клия, 1952, 1954), Н. П. Ермакова (1950), А. В. Лоскутова (1959), Д. П. Григорьева (1948) и др.

Этими работами было показано, что морфология газовой-жидких включений определяется большим количеством факторов. Главными из них следует считать следующие.

1. Механические или первичные факторы, определяемые характером образования включений. Например, образование канальчатых включений вслед за отталкиваемым и включающимся газовым пузырьком или твердой частицей, образование включений при скелетном росте кристалла, образование плоских и ветвистых включений в трещинах.

2. Физико-химические или вторичные факторы, определяемые характером преобразования включений. Например, перешнуровывание включений в трещинах, отложение вещества кристалла на стенках включений, рост крупных включений за счет мелких, регулируемые особенностями изменения температуры, давления и концентрации во времени.

3. Структурные или внутренние факторы, определяемые симметрией и структурой кристаллов-носителей. Например, преобразование формы включений в направлении равновесной формы, характерной для кристалла-носителя. К газовой-жидкому включению применимо понятие отрицательный кристалл, характеризующийся теми же закономерностями морфологии, как и положительный кристалл.

Проведенное нами изучение морфологии газовой-жидких включений в кристаллах берилла подтверждает полученные ранее закономерности.

сти, но также дает еще ряд закономерностей, имеющих минералогенетическое значение.

Минерал берилл изучался из разнообразных типов эндогенных месторождений: пегматитов, грейзенов, измененных гранитных, ультраосновных и карбонатных пород на собственном материале и материале из музеев и частных коллекций.

В бериллах развиты все типы включений: первичные, вторичные и мнимовторичные. Особенно характерны для берилла канальчатые первичные включения, ориентированные вдоль оси *C*, которые и ранее отмечались многими исследователями (Laemmlein, 1929; Cameron, Rawe, Weis, 1953; Ермаков, 1950; Беус, 1960; Фекличев, 1962). Канальчатая форма и ориентировка включений в кристаллах берилла зависит от особенностей симметрии и структуры берилла и анизотропии роста его кристаллов. При преимущественном разрастании кристаллов берилла вдоль оси *C* вслед за отталкиваемыми гранью (0001) газовыми пузырьками или твердыми частицами образуются канальчатые включения (табл. XXIX, *г, д*). Наблюдаются более крупные первичные включения неправильной или округлой формы, являющиеся чаще всего многофазными (табл. XXX, *а*).

Характер преобразования первичных включений зависит от растворимости берилла, которая увеличивается с температурой и концентрацией растворяющих агентов. Длительное пребывание включений при повышенных температурах при очень медленном спаде температур (это характерно для бериллов из занорышей в грейзенах) приводило к образованию отрицательных кристаллов, ограненных подобно самим кристаллам берилла. Такие включения образовывались на месте первичных канальчатых включений в результате перекристаллизации их стенок. Этому способствовало содержание в таких включениях жидкой CO_2 и галогенидов щелочей (табл. XXX, *б, в*). Крупные первичные включения менее подвержены процессам преобразования своей формы (табл. XXX, *г*).

Для бериллов из других типов месторождений, в особенности для метасоматических бериллов, перекристаллизация стенок включений менее характерна, особенно когда во включениях не содержится жидкая углекислота и нет твердых галогенидов щелочей (табл. XXXI, *а, б*).

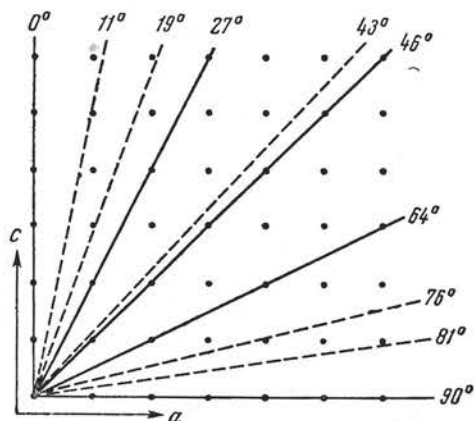
Мнимовторичные и особенно вторичные включения, приуроченные к залеченным трещинам, в большинстве случаев не имеют правильной формы. Некоторые трещины разрыва, не пересекающиеся с первичными включениями и не сообщающиеся с поверхностью кристалла, заполнены вакуумом. Особенно они характерны для плоскости (0001). У них раковистая или плоская поверхность стенок (табл. XXXI, *в*). В зональных кристаллах берилла на границе зон разного состава образуются перпендикулярно идущие ветвистые трещины, не выходящие на поверхность кристалла. Они также большей частью заполнены вакуумом.

При метаморфизме равномерно распределенных первичных канальчатых включений вдоль произвольно направленных трещин и других ослабленных участков наблюдаются укрупненные мнимовторичные включения. Помимо произвольно направленных трещин, ослабленными участками являются внутренние швы срастания блоков в кристаллах берилла, границы зон, отличающихся по физическим свойствам, направления спайности (табл. XXXI, *г, д* и табл. XXXII, *а*).

Мнимовторичные и вторичные включения в залеченных трещинах и других ослабленных участках, пересекающих первичные включения, трудно отличить друг от друга, так как сложно установить, сообщались ли залеченные трещины с поверхностью кристалла, иногда же это можно проследить. Вторичные включения в залеченных трещинах обнаруживают постепенные переходы от незалеченных трещин, сплошь

заняты маточной средой или содержащих ее в расширенных участках в виде овальных, линзовидных участков (такие включения сообщаются вдоль трещин с поверхностью и их при нагревании можно перемещать), к трещинам, частично залеченным, с перешнурованными включениями. Хорошо ограниченные вторичные включения в залеченных трещинах встречаются очень редко.

Поскольку поверхность газово-жидких включений есть поверхность отрицательных кристаллов, то для них должны быть характерны те же простые формы, которые характеризуют сами кристаллы берилла, т. е. формы, относящиеся к виду симметрии L_6L_27PC . Следовательно ожидать, что и элементы гранного микрорельефа на поверхности кристаллов берилла и газово-жидких включений будут наблюдаться те же самые.



Фиг. 26. Направления ребер в плоских реберных формах роста и растворения на грани (1010) берилла.
 — направления для роста; - - - направления для растворения;
 центры проекций элементарных ячеек

Закономерности микроморфологии гранного рельефа на кристаллах берилла, обусловленного ростом и растворением, и критерии отличия микроскульптур роста от микроскульптур растворения на кристаллах берилла, были нами ранее разобраны (Фекличев, 1962, 1963). В микрориссталломорфологическом анализе (Фекличев, 1964) кристаллов берилла основным критерием отличия скульптур роста от скульптур растворения являются направления ребер микроскульптур по отношению к геометрическим элементам важных граней кристаллов берилла. Наиболее удобной и важной гранью является грань (1010) (фиг. 26).

Методика микрориссталломорфологического анализа (Фекличев, 1962) была применена к поверхности газово-жидких включений в кристаллах берилла. В результате было обнаружено, что все элементы микроморфологии газово-жидких включений в кристаллах берилла относятся к скульптурам роста. Даже в явных случаях перекристаллизации участки, которые должны были растворяться, покрыты скульптурами роста. Скульптур растворения и их элементов, таких, какие мы наблюдаем на поверхности растворенных граней кристаллов берилла, обнаружено не было. Мы объясняем это тем, что исследование проводилось при комнатной температуре, когда процессы дорастания и перекристаллизации стенок газово-жидких включений в кристаллах берилла прекратились. Возможно, при повышенных температурах, когда перекристаллизация стенок включений возможна, в участках растворе-

ния стенки включений были покрыты скульптурами растворения. Но при последующем снижении температуры процессы растворения и перекристаллизации прекратились, а откладывался во всех участках поверхности включения избыток вещества берилла и образующиеся в результате скульптуры роста перекрыли большие скульптуры растворения.

На табл. XXXII, б, в, г показаны примеры гранного микрорельефа роста на поверхности газовой-жидких включений в кристаллах берилла.

Особенно интересным оказалось то, что набор простых форм роста на поверхности граней первичных газовой-жидких включений и кристаллов берилла в большинстве случаев оказался тождествен. Это говорит о близости условий отложения вещества берилла на поверхности кристаллов берилла и внутри включений.

Процессы перекристаллизации и дорастания стенок включений в бериллах из занорышей в пегматитах доходят* до того, что образуются включения совершенно правильной формы с гладкими гранями, почти не имеющими скульптур роста (табл. XXXII, д; табл. XXXIII, а). Это редко происходит с мнимовторичными включениями и никогда не происходит с вторичными включениями, которые покрыты большим количеством мелких граней, обусловленных малой интенсивностью процессов перекристаллизации (табл. XXXIII, б). В некоторых включениях даже эти элементы микрорельефа не наблюдались, так как процессы перекристаллизации отсутствовали.

Проведенные исследования позволяют сделать ряд генетических выводов.

1. Морфология газовой-жидких включений в кристаллах зависит от условий роста и изменения последних.

2. Чем выше температура образования кристаллов и длительнее период нахождения кристаллов при повышенной температуре и высокой концентрации растворяющих агентов в период кристаллизации, тем более правильную форму имеют включения.

3. Наиболее правильную форму — форму отрицательных кристаллов первичные газовой-жидкие включения имеют в кристаллах берилла из занорышей в пегматитах.

4. Формы газовой-жидкого включения в виде отрицательного кристалла является формой роста, а не растворения.

5. Простые формы отрицательных кристаллов первичных газовой-жидких включений, как правило, подобны простым формам кристаллов-носителей.

6. Простые формы микроскульптур роста на гранях первичных газовой-жидких включений в кристаллах, как правило, подобны простым формам микроскульптур роста на гранях кристаллов-носителей.

7. Подобие простых форм роста на первичных газовой-жидких включениях и кристаллах-носителях является важным аргументом в пользу тождественности среды кристаллизации, заключенной в первичных газовой-жидких включениях, и среды кристаллов-носителей.

8. Простые формы вторичных газовой-жидких включений и микроскульптур на их гранях могут быть не подобны таковым на кристаллах-носителях.

9. Нахождение первичных газовой-жидких включений неправильной (ветвистой, извилистой) формы в кристаллах берилла, образовавшихся при низкой температуре и быстрой кристаллизации независимо от момента образования месторождений берилла в геологической истории, говорит о том, что при низкой температуре не происходит перекристаллизации стенок первичных газовой-жидких включений в кристаллах берилла.

*О содержимом первичных газово-жидких
и многофазных включений в кристаллах берилла*

Состав газово-жидких и многофазных включений в кристаллах берилла разнообразен.

Наибольший интерес для нас представляют первичные включения, отражающие химизм среды кристаллизации берилла. Проведенный нами просмотр под микроскопом большого количества кристаллов берилла и пластинок, выпиленных из замутненных кристаллов берилла из самых различных типов месторождений, показал, что среди газово-жидких включений преобладают по составу два типа: включения с жидкой углекислотой и водным раствором и включения с одним водным раствором. Наиболее широко развиты трехфазовые включения с водным раствором и жидкой и газообразной углекислотой (табл. XXXIV, а, б).

Соотношение между различными жидкими и газообразными фазами может быть самым разнообразным.

Многофазные включения, содержащие твердую фазу, столь же разнообразны по составу. Среди них наиболее широко распространены включения, содержащие водный раствор, твердую фазу и газовый пузырь.

Твердая фаза кристаллическая, но в некоторых кристаллах нами наблюдались хлопья аморфного вещества.

Минералы-узники представлены следующими достоверно определенными веществами: галит, сильвин, кварц, мусковит, биотит, кальцит.

Остальные минералы достоверно не определены, но по свойствам предполагаются: гематит, альбит, танталит, фенакит, турмалин и др. Примеры многофазных включений с твердой фазой даны на табл. XXXIV, в, г, д, е.

Обычно в многофазном включении заключено несколько твердых фаз. Количество твердой фазы по отношению к жидкой и газообразной может достигать 60%, например, в бериллах из занорышей пегматитов.

Набор и характер твердых фаз в первичных включениях характеризует состав и концентрацию среды кристаллизации берилла. Для бериллов из пегматитов характерны силикатные и солеобразные минералы-узники (доля их в объеме включения велика); для бериллов гидротермально-пневматолитовых месторождений характерны солеобразные минералы-узники. Высокое содержание твердой силикатной и солевой фазы во включениях в бериллах из пегматитов говорит о соответственно высокой концентрации растворов при кристаллизации берилла.

По-видимому, силикаты полностью были растворены в концентрированном солевом растворе при высокой температуре и давлении во время кристаллизации берилла.

Важные сведения о химизме включений дают химические анализы водных и кислотных вытяжек. К сожалению, по этому вопросу мы не располагаем полными данными. Однако имеющиеся в нашем распоряжении анализы водных вытяжек из включений в бериллах из двух разных типов месторождений характеризуют состав водных растворов внутри включений.

Один анализ был нами опубликован ранее (Фекличев, 1962), второй любезно предоставлен Д. Н. Хитаровым.

Химические анализы водных вытяжек свидетельствуют о большой

роли щелочных и галоидных элементов, а также углекислоты в минералообразующем растворе при кристаллизации берилла.

**Химический анализ водной вытяжки из включений
в берилле из грейзенового месторождения**

(Европейская часть СССР), по Д. Н. Хитарову:

Ионы	мг/100 г образца	Ионы	мг/100 г образца
Na ⁺¹	2,1	Si ⁺⁴	1,9
K ⁺¹	4,1	HCO ₃ ⁻¹	20,1
Ca ⁺²	7,6	Ce ⁻¹	7,0
Mg ⁺²	0,5	F ⁻¹	4,8
Al ⁺³	0,1		

**Химический анализ* твердого осадка водной и солянокислой
вытяжек из включений в берилле из пегматита**

(из навески берилла 0,9158 г)

Компоненты	Количество, г
CaO**	0,0012
Fe ₂ O ₃ **	0,0071
Na***	0,0069
K***	0,0088
Li***	0,00042

* Определено количественным химическим анализом из солянокислой вытяжки (аналитик Г. Ф. Галактионова).

** Определено методом фотометрии пламени из водной вытяжки (аналитик Г. Н. Попова).

*** Углекислота в вытяжке не определялась, но она присутствовала во включениях в значительном количестве, что было доказано путем гомогенизации ее жидкой и газобразной фаз.

Общие закономерности связи свойств, строения, состава и условий образования берилла

Единство зависимостей физических свойств и строения берилла от химического состава

Все материалы по физическим свойствам, строению и химическому составу берилла указывают на общность закономерностей в зависимостях между ними.

Изменения химизма берилла выражаются в изоморфных замещениях, идущих в двух направлениях: 1) замещение Al на более крупные и тяжелые катионы: Fe^{+2} , Fe^{+3} , Cr^{+3} , Sc^{+3} , Mg^{+2} ; 2) вхождение в каналы в структуре берилла щелочных и щелочноземельных ионов: Li, Na, K, Cs, Rb, Ca, Ba и воды с параллельным уменьшением берилла в тетраэдрах. Замещение Be^{+2} на Al^{+3} , Si^{+4} на P^{+5} и т. д., пока редкие случаи и их можно не принимать во внимание.

Два основных направления в изменении химизма берилла хорошо согласуются с изменением строения и физических свойств берилла.

Ранее мы подробно вскрыли общность причины и характера изменения химических и кристаллографических свойств берилла в связи с изменением содержания главной примеси в его составе — щелочей (Фекличев, 1960). Поскольку примеси щелочей действительно являются главными и наиболее распространенными примесями в берилле, то выведенные закономерности справедливы для большинства бериллов.

К настоящему времени четко установлено, что в щелочных бериллах, не содержащих существенных количеств других примесей, с увеличением количества щелочей (параллельно с этим увеличивается количество воды и уменьшается количество Be) происходят следующие изменения физических свойств берилла:

а) увеличивается объем и разница в параметрах элементарной ячейки и параметр C увеличивается больше, чем параметр a ;

б) увеличивается двупреломление и показатель преломления N_o увеличивается больше, чем показатель преломления N_e ;

в) габитус из призматического постепенно переходит в короткопризматический и пластинчатый;

г) усиливается штриховка параллельно (0001);

д) усиливается отдельность параллельно (0001);

е) появляется склонность к образованию сростков параллельно (0001).

Все эти явления говорят о том, что с увеличением количества щелочей в берилле: а) изменяется и усиливается анизотропия свойств его кристаллов; б) в структуре берилла все более преобладают моменты, усиливающие проявление горизонтальных, параллельных оси a , и ослабляющие проявление вертикальных, параллельных оси C , свойств.

Зависимость физических свойств берилла от содержания примесей, замещающих Al, выражена менее четко, так как она затуманена ввиду

обычного присутствия наряду с этими примесями и примесей щелочей. Однако свойства бесщелочных бериллов, но содержащих значительные количества железа, хрома, скандия, магния, достаточно определенно указывают, что с увеличением содержания этих примесей в бериллах происходят следующие изменения:

- а) увеличивается объем и разница в параметрах элементарной ячейки и параметр a увеличивается больше, чем параметр C ;
- б) габитус из призматического постепенно переходит в длинно-призматический и игольчатый;
- г) усиливается штриховка параллельно $(10\bar{1}0)$;
- д) усиливается отдельность параллельно $(10\bar{1}0)$;
- е) появляется способность к образованию сростков параллельно $(10\bar{1}0)$.

Все эти явления говорят о том, что с увеличением количества Fe, Cr, Sc и Mg в берилле: а) изменяется и усиливается анизотропия свойств его кристаллов; б) в структуре берилла все более преобладают моменты, усиливающие проявление вертикальных, параллельных оси C , и ослабляющие проявление горизонтальных, параллельных оси a , свойств.

Анизотропия физических свойств кристаллов объясняется анизотропией плотности распределения атомов в структуре кристалла. Увеличение разницы в плотностях распределения атомов в определенных направлениях в структуре кристалла увеличивает разницу в физических свойствах кристалла для определенных направлений. Все главные примеси в берилле при своем вхождении в его структуру увеличивают анизотропию физических свойств. Это хорошо согласуется с тем, что все они увеличивают разницу в плотностях распределения атомов для разных направлений в кристаллах берилла.

Если общее увеличение анизотропии характерно для всех примесей, то знак или направление изменения анизотропии противоположно для двух основных выделенных групп примесей. Примеси щелочей увеличивают значение свойств вдоль параметра a , а примеси, замещающие Al,—вдоль параметра C . Это находит хорошее объяснение в том, что линейная молекулярная плотность (ретикулярная плотность) вдоль параметра a в берилле с увеличением щелочей в его составе увеличивается относительно быстрее, чем вдоль параметра C . Линейная молекулярная плотность (ретикулярная плоскость) вдоль параметра C в берилле с увеличением примесей, замещающих Al, увеличивается относительно быстрее, чем вдоль параметра a .

Берилл как геохимический индикатор

Большая изоморфная емкость берилла (см. табл. 6) на значительное число элементов и изменчивость набора и содержания элементов в зависимости от условий образования позволяют использовать этот минерал в качестве геохимического индикатора. Впервые такое предложение сделал А. И. Гинзбург (1952). В главе 2 мы приводили некоторые закономерности по содержанию элементов в бериллах разного происхождения. Наиболее важная из них закономерность, касающаяся главных примесей в берилле — щелочей. Для бериллов из пегматитового процесса по мере его развития характерно постепенное увеличение содержания щелочей с параллельной сменой значения определенных щелочей в следующем порядке: K, Na, Li, Cs, Rb.

Для грейзеновых месторождений и альбитизированных гранитов характерна также разная роль щелочей в их составе. В грейзеновых месторождениях, связанных с кислотным выщелачиванием, в составе

берилла щелочи, как правило, отсутствуют. В грейзенах, связанных со стадией альбитизации и в альбитизированных гранитах, в бериллах всегда отмечается повышенное количество щелочей, в основном Na.

Повышенные количества железа обычно характерны для бесщелочных бериллов — из незамещенных пегматитов, из грейзенов, связанных с кислотным выщелачиванием, из высокотемпературных гидротермально-пневматолитовых месторождений. Цвет бесщелочных бериллов позволяет судить об окислительно-восстановительном потенциале. Синий цвет указывает на окислительную обстановку (содержание Fe^{+3}), желтый цвет — на восстановительную обстановку (содержание Fe^{+2}). Эти данные подтверждаются и тем, что с синим бериллом обычно ассоциируют окислы и кислород — содержание соли: тематит, касситерит, вольфрамит, с желтым и зеленым бериллами ассоциируют в основном сульфиды: пирит, арсенопирит, молибденит, халькопирит.

Высокие содержания Mg и Ca характерны для бериллов, образовавшихся в месторождениях, где вмещающими породами служат основные, ультраосновные или карбонатные породы.

Изумруды, окрашенные Cr, связаны с месторождениями, развитыми в измененных ультраосновных породах, а изумруды, окрашенные Cr или V, в битуминозных известняках.

Розовые бериллы, содержащие редкие щелочи, Mn и не содержащие железа, всегда характерны для заключительных стадий пегматитового процесса.

Редко наблюдаемые бериллы аномального состава, содержащие много щелочей, а также Mg, Ca, Fe (Cr) характерны для гранитных пегматитов, развитых в основных и ультраосновных или гибридных породах.

Приведенные закономерности позволяют по химическим особенностям берилла в некоторых случаях надежно устанавливать тип его месторождения. Для слабощелочных, окрашенных железом бериллов и натриевых бериллов определить принадлежность их к определенному типу месторождения затруднительно.

Типоморфизм берилла

Многие исследователи физических свойств минералов еще продолжают выводить эти свойства непосредственно из условий образования минерала, что логически неверно и может привести к ошибкам. Минералы с совершенно одинаковыми физическими свойствами могут образовываться в совершенно различных условиях. Влияние внешней среды на физические свойства минерала проявляется через химический состав минерала. Поэтому схема поисков зависимости физических свойств минерала от генезиса есть изучение зависимости физических свойств от химического состава, а затем зависимости химического состава от генезиса.

Сказанное заставляет с большой осторожностью относиться к применению типоморфных признаков минералов, выраженных в их характерных физических свойствах (исключая химические), для решения генетических вопросов.

Берилл характеризуется разнообразным генезисом. Он образуется в пегматитах и разнообразных гидротермально-пневматолитовых месторождениях, связанных с гранитной магмой. Выделяясь почти во всех стадиях этих процессов и являясь в них типоморфным минералом, берилл закономерно меняет свои типоморфные признаки.

К типоморфным признакам берилла прежде всего относятся визуально определяемые его свойства: морфология кристаллов, цвет. Но к ним в совокупности должны относиться и другие физические свой-

ства: светопреломление, удельный вес, размеры элементарной ячейки и др.

Изменение типоморфных признаков берилла в основном в гранитных пегматитах чистой линии стало известным благодаря работам по минералогии берилла. А. Е. Ферсман (1940) считал берилл ярко выраженным типоморфным минералом.

Приводим полностью характеристику типоморфных свойств берилла по А. Е. Ферсману.

«Берилл (изумруд, аквамарин, морганит, воробьевит-ростерит). Принадлежит к весьма типичным типоморфным минералам совершенно определенного рода:

Геофазы В—С—синий берилл в первичных выделениях магматической породы (особенно в пневматолитах); длинные призмы.

Геофазы D—E—желтый, золотистый иногда бурый берилл.

Таблица 36

Обобщенные типоморфные свойства бериллов из различных типов пегматитов и грейзенов

Свойства	Незамещенные пегматиты и грейзены кислотного выщелачивания	Альбитизированные пегматиты и грейзены стадии альбитизации	Ленидолитизированные пегматиты
Химические особенности	Бесщелочные или слабощелочные, повышенное содержание железа	Около 1,5% R_2O , главным образом Na_2O	Характерны редкие щелочи Li_2O , Cs_2O , Rb_2O и следы MnO
Цвет	Интенсивный голубой, зеленый, желтый	Бледный, чаще всего зеленоватый	Белый, светло-розовый
Уд. вес	2,6	2,7	2,8
Светопреломление			
<i>№</i>	1,57	1,58	1,59
<i>№</i> — <i>№</i>	0,003	0,005	0,007
Твердость, <i>кг/см</i> ²	1400	1200	1000
Габитус	Длиннопризматический	Призматический	Короткопризматический

Геофазы E—F—главная область выделения берилла: зелено-синего аквамарина, постепенно ослабевающего тона и переходящего в совершенно бесцветный берилл; длина призм сокращается.

Геофаза F—берилл в короткостолбчатых кристаллах с некоторым накоплением щелочей (Na_2O , K_2O , Cs_2O , Li_2O , H_2O) и блестящими гранями базопинакоида.

Геофаза G—розовый воробьевит (ростерит) короткий, плоский, с большим содержанием Cs_2O и Li_2O (3,5—1,5%), удельный вес достигает своего максимума; плоские ростериты».

Данные А. Е. Ферсмана в настоящее время могут быть существенно дополнены в отношении бериллов непегматитовых месторождений в связи с новыми исследованиями их и открытием новых типов гидротермально-пневматолитовых месторождений.

В грейзеновом процессе по типоморфным особенностям выделяется сходный ряд бериллов, который можно сопоставить с рядом начала пегматитового процесса. Во многих случаях по химическому составу и физическим свойствам бесщелочные и натриевые бериллы из пегматитов и грейзенов невозможно отличить друг от друга.

В таблице 36 сопоставляются характерные обобщенные типоморфные свойства бериллов из основных типов пегматитов и грейзенов.

Грейзенизированные граниты, когда в них проявлена альбитиза-

ция, содержат такие же натриевые бериллы, которые характерны для альбитизированных пегматитов и грейзенов стадии альбитизации.

Для гидротермально-пневматолитовых месторождений не грейзенового характера типоморфные особенности бериллов изучены слабо. В основном в них развиты бесщелочные бериллы разного цвета: зеленого, голубого, желтого. Голубые и зеленые бериллы обычно встречаются в ассоциации с окисными рудными минералами, а желтые и зеленые с сульфидными.

Изумруды из измененных ультраосновных пород обычно можно отличить по типоморфным признакам от изумрудов из битуминозных карбонатных пород. Первые окрашены в яркий изумрудный цвет, образуют чаще сростки, чем одиночные кристаллы, причем на гранях всех кристаллов наблюдается сильный рельеф метасоматического роста. Вторые окрашены в зеленый цвет, но имеющий желтоватый оттенок, одиночные кристаллы обычно хорошо огранены.

Отличительные признаки бериллов, кристаллизовавшихся разным способом

Выше приведенные материалы и закономерности строения берилла позволяют отличать бериллы, кристаллизовавшиеся в полости и метасоматическим путем. При этом необходимо использовать всю совокупность свойств берилла, все сведения о его строении.

Обобщенные признаки, позволяющие отличать бериллы, кристаллизующиеся свободно в полости и метасоматическим путем, сведены в табл. 37. Необходимо учитывать, что большинство этих признаков не являются безоговорочными критериями. Использование их не должно быть шаблонным, поскольку в природе могут быть исключения.

Таблица 37

Признаки, отличающие бериллы, кристаллизовавшиеся свободно в полости и метасоматическим путем

Признаки	Свободная кристаллизация в полости	Метасоматическая кристаллизация
Однородность состава, свойств и строения	Чаще однородные	Чаще неоднородные
Форма и огранка одиночных кристаллов	Чаще хорошо ограненные кристаллы	Чаще плохо ограненные кристаллы, угнетенные формы
Гранный микрорельеф	Микрорельеф свободного роста, грани зеркальные	Микрорельеф метасоматического роста, грани матовые
Распределение неоднородностей строения; зональность	Зональность, если проявлена, то четкая и правильная	Характерно пятнистое распределение неоднородностей, границы зон нечеткие и неровные
Форма первичных включений	Чаще правильная (отрицательные кристаллы), особенно высокотемпературные	Чаще неправильная
Прозрачность	Обычно прозрачны	Обычно непрозрачны

Бериллы, кристаллизовавшиеся в полости совместно, особенно трудно отличать, так как они несут на себе признаки и свободной кристаллизации и метасоматической. Обычно у таких бериллов признаки, связанные с внутренним строением, отвечают свободной кристаллизации, а признаки, связанные с внешним строением, метасоматической кристаллизации.

Условия образования берилла

а) по экспериментальным данным

Опыты по синтезу кристаллов минералов всегда много дают для познания условий образования последних. К сожалению, несмотря на большое количество работ, посвященных синтезу берилла, в большинстве их параметры опытов не сообщаются. Объясняется это тем, что берилл и особенно изумруд получался для ювелирных целей, а в последнее время как сырье для изготовления лазеров (Goodwin, 1961), и работы засекречивались. Однако сведения о строении и свойствах синтетических кристаллов берилла могут помочь в выяснении условий их образования.

Кроме того, некоторые сведения об условиях образования синтетических бериллов в печати имеются.

Обзор работ по синтезу берилла в XIX в. дал П. Н. Чирвинский (1903—1906).

Первый синтез берилла в виде изумруда был выполнен во Франции Эбельменом в 1948 г. (Ebelmen, 1948). Призматические мелкие кристаллы (менее одного миллиметра) изумруда были получены им при сплавлении порошка изумруда с борным ангидридом. Хаутфейл и Перрей (Hautefeuille, Perrey, 1888) сплавляли стехиометричного состава берилла смесь окислов SiO_2 , BeO и Al_2O_3 с примесью Cr_2O_3 с молибденовокислым литием при температуре 800° в течение двух недель. Полученные кристаллы берилла и изумруда имели формы $\{1010\}$, $\{0001\}$, $\{1120\}$. Наблюдались также притупления на горизонтальных ребрах базиса и на вершинах его плоских углов. Удельный вес синтезированного берилла и изумруда 2,67, химический состав: SiO_2 — 67,7; Al_2O_3 — 16,6; BeO — 13,4; сумма — 100,7. Кристаллы были бесцветными, также имели желтовато-зеленый и зеленый цвет. Оптический знак — отрицательный. Траубе (Traube, 1894) получал при обычных условиях осадок состава $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18} + 4\text{H}_2\text{O}$ сливанием водных растворов Na_2SiO_3 , BeSO_4 и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Осадок после высушивания сплавлялся с борным ангидридом. В верхней части сплава образовались бесцветные гексагональные таблитчатые и призматические кристаллики, одноосные, оптически отрицательные. Химический состав: BeO — 13,48; Al_2O_3 — 18,61; SiO_2 — 67,38; сумма — 99,47.

Гидротермальный синтез изумруда был впервые осуществлен Накенном в 1928 г., о работах которого сообщает Ван Прааг (Van Praagh, 1947). Методика мало отличалась от методики гидротермального выращивания кварца. На дне автоклава помещалась смесь окислов в стехиометричном отношении, отвечающем составу берилла. Автоклав заполнялся водой с минерализующими добавками (сода и др.) и красителем (Cr). При температуре, близкой к критической, компоненты переносились с водяным паром на затравку берилла, подвешенную в верхней части автоклава. Кристаллы длиной до 1 см были получены за несколько дней при большой концентрации минерализатора. При уменьшении его концентрации скорость роста снижалась, но уменьшалось в кристаллах количество дефектов и включений.

Эспиг (Espig, 1935), Ягер и Эспиг (Jaeger & Espig, 1935) описали синтетический изумруд, представляющий гексагональные призмы до 2 см длиной, обладающий зональной структурой. Об условиях выращивания этих кристаллов ничего не сообщается. Выращенные ими кристаллы были тщательно исследованы Шибольдом (Shiebold, 1935).

Армштурц и Борлоз (Armstutz, Borloz, 1935) предлагали выращивать берилл из расплава BeO , Al_2O_3 , SiO_2 в BeF_2 .

Одновременно с немецкими работами по синтезу изумруда проводились работы в США Чатамом по синтезу берилла и впоследствии изумруда. Об условиях этих опытов известно также очень мало.

Исследование синтетических изумрудов Чатама, проведенное Гогерсом и Сперисеном (Gegers and Sperisen, 1942), показало следующее. Американский синтетический изумруд представлен кристаллами размером 2,5—5 мм с формами $\{10\bar{1}0\}$, $\{11\bar{2}0\}$, $\{0001\}$. На поверхности кристаллов видны скульптуры роста в виде вициналей. Изумруды окрашены в ярко-зеленый цвет и имеют зональное строение. В скрещенных николях в базальном сечении наблюдаются оптические аномалии и оптически секториальное строение. Наблюдаются пирамиды роста.

Плеохроизм: *No* — желто-зеленый, *Ne* — голубовато-зеленый; светопреломление: *No* — 1,578, *Ne* — 1,573, *No* — *Ne* — 0,003; уд. вес — 2,667. Химический анализ см. в табл. 8.

Наблюдались включения двух типов: 1) темно-красные изотропные кристаллы с высоким рельефом, 2) жидкие включения неправильной формы, судя по фотографии, являющиеся вторичными.

Самый крупный синтетический изумруд, весящий 1014 карат, был синтезирован Чатамом в 1953 г. (Rocks and Minerals, 1954).

Майер (Mayer, 1955) считал, что Чатам не выращивает, а культивирует берилл, залечивая и уничтожая в больших природных кристаллах берилла трещины и другие дефекты и производя их окрашивание.

Кулаков (Kulakov, 1956) и Худоба (Chudoba, 1956) считали, что изумруд Чатамом получен из раствора при высоких температуре и давлении.

Вебстер (Webster, 1955) рассмотрел физические свойства изумрудов разного происхождения и критерии отличия синтетических изумрудов от природных. Он также разбирает вопросы синтеза изумруда.

Вильке (Wilke, 1956) сообщает, что Эспиг получил крупные кристаллы изумруда (до 2 см) при реакции раствора-расплава BeO , Al_2O_3 в минерализаторе с твердым кварцем.

Ван Валкенбург и Вейр (Van Valkenburg and Weir, 1957) сообщают о гидротермальном синтезе берилла при высоком давлении и температуре 500—850°С. Выше 900°С берилл в присутствии воды медленно переходит в фенакит и стекло. Природные бериллы, потеряв воду, переходили при 1475° в жидкость + фенакит.

Виарт и Шавничар (Wyart, Sóavnicár, 1957) опубликовали подробные данные об условиях гидротермального синтеза берилла из стехиометричной бериллу смеси Al_2O_3 , SiO_2 и BeCO_3 . Объем автоклава из нержавеющей стали — 40 см³, заполнение 0,63 г/см³, температура 400—600°, давление 400—1500 бар, время опыта 4—10 дней. Во всех опытах получен берилл, размеры кристаллов с повышением температуры повышались, достигая сотых долей миллиметра. Вместе с призматическими кристаллами берилла наблюдались фенакит и хризоберилл. Прибавление NaHCO_3 вызвало образование альбита, а Cr_2O_3 — изумруда.

В Японии Сейто, Кубота и Кунимоти (Saito, Kubota, Kunimoto, 1958) провели гидротермальный синтез берилла следующим образом. Измельченный в порошок сплав стехиометричной бериллу смеси BeO , Al_2O_3 и SiO_2 с 20% Na_2CO_3 подвергался перекристаллизации в 3%-ном растворе NaOH при 320—360°. Получены крупные кристаллы берилла.

Методы синтеза изумруда разобраны Эплером (Eppler, 1958), который считает, что присутствие фенакита во многих синтезах говорит о недостатке Al_2O_3 при образовании берилла.

Губелином (Gubelin, 1960—1961) детально исследовались подделки драгоценных камней, состоящие из ядра бесцветного или слабо окрашенного обычного берилла, покрытого тонким слоем изумруда, полученного синтетическим путем. На основании материалов исследований

(смотри о включениях) делаются предположения об условиях роста изумрудных покрытий: гидротермальный рост в автоклаве при давлении около 1000 атм и температуре 300—400° С.

В последнее время были проведены важные экспериментальные исследования, вскрывающие условия образования берилла в процессах высокотемпературного послемагматического минералообразования (Брус, Соболев, Диков, 1963).

Первая серия опытов проводилась в автоклавах при температуре 490—540°, с заполнением 0,2—0,3 в течение 72 часов. В верхней части автоклава в тигле помещался микроклин-пертит. В автоклаве находились растворенные фтористые соединения бериллия. В процессе опыта бериллий в виде его комплексных соединений переносился в паровой фазе в верхнюю часть автоклава. Кислые растворы, содержащие фтор-комплексы бериллия, реагируя с микроклин-пертитом, образовывали зону берилл-альбита. Повышение щелочности растворов растворяло выделившийся берилл и фронт берилла-альбита постепенно перемещался в глубину тигля.

Процесс растворения берилла первой генерации был ими изучен также опытным путем. К крышке автоклава подвешивался кристалл берилла. На дне помещались полевые шпаты, соединения Be. Заполнение бралось 0,5 в виде 2,5—7%-ного раствора HF. Опыты велись при температуре 500—600° в течение 1—7 суток. Результаты опытов сводились к следующему:

1. В опытах, в которых кислый реагирующий раствор не был насыщен по отношению к бериллию, алюминию и сильным основаниям, наблюдалось замещение берилла по трещинам кварцем, а также образование корочки кристаллов α -кварца на поверхности берилла.

2. Во всех опытах, в которых реагирующий раствор был насыщен по отношению к фторкомплексным соединениям бериллия, имеет место растворение берилла, идущее с разложением минерала. Для ранней стадии взаимодействия характерна низкая активность алюминия в растворе, которая, по всей вероятности, обусловлена образованием его фтористых комплексов. При этом происходит вынос алюминия из берилла и замещение берилла берtrandитом.

3. Насыщение растворов алюминием и увеличение их щелочности в ходе опыта (за счет переработки полевых шпатов) имеет своим результатом образование на передовом фронте замещения зоны мусковита в сростании с кристаллами берtrandита.

Полученные ассоциации минералов хорошо согласуются с природными.

Из приведенного выше обзора можно сделать некоторые выводы, проливающие свет на условия образования берилла. Берилл может образовываться гидротермальным путем при температурах, близких к критической температуре воды и выше в условиях средней щелочности или кислотности.

Высокая щелочность или высокая кислотность растворов приводит к растворению берилла. Большая роль в переносе компонентов при кристаллизации берилла принадлежит подвижным комплексным соединениям. Поле устойчивости берилла также определяется относительной активностью алюминия в растворе.

б) по результатам изучения строения кристаллов

Особенности строения берилла позволяют судить об условиях его образования: температуре, давлении, концентрации минералообразующей среды. Прежде всего эти сведения дает исследование газовой-жидких включений. Сопоставление имеющихся данных по гомогенизации

газово-жидких включений в кристаллах берилла позволяет заключить, что он может кристаллизоваться в широком диапазоне температур от 180 до 700°. Большинство данных говорит за то, что берилл кристаллизуется в пегматитах — при 400—500°, в гидротермально-пневматолитовых месторождениях при 200—400°. О давлении можно судить только по сравнению с данными для других минералов, находящихся в парагенезисе с бериллом или кристаллизовавшихся в аналогичных месторождениях. Это давление, безусловно, превышало 200—300 атм и в занорышах пегматитов, по-видимому, превышало 1000 атм, как мы заключили при исследовании газово-жидких включений в таких бериллах.

Таблица 38

Твердые фазы внутри включений и в парагенезисе с бериллом

Тип месторождения	Минералы-узники во включениях	Главный парагенезис
Занорыши пегматита	Кварц, мусковит, галит, сильвин, турмалин	Кварц, мусковит, турмалин, полевой шпат
Альбитизированные пегматиты	Мусковит, галит, сильвин	Мусковит, альбит
Грейзены	Мусковит, галит	Мусковит, альбит
Измененные змеевики	Биотит, кальцит, актинолит	Биотит, актинолит
Битуминозные известняки	Карбонаты, галит	Карбонаты

О составе минералообразующих растворов, из которых кристаллизовались бериллы, можно судить на основании состава газово-жидких включений и одновременно отлагавшихся с бериллом минералов. Интересно, что сопоставление и тех и других данных для бериллов из разных месторождений указывает на отложение одних и тех же нерастворимых в воде минералов в ассоциации с бериллом и внутри газово-жидких включений (как минералов-узников) (табл. 38). Но во включениях присутствуют дополнительные продукты — воднорастворимые соли, углекислота, которые вместе с водой растворяли нерастворимые в чистой воде минералы. Среди воднорастворимых солей чаще всего присутствуют галит и сильвин, что говорит о большой роли галогенидов щелочей в минералообразующей среде при кристаллизации берилла. Анализы водных вытяжек подтверждают это.

Углекислота, нередко жидкая и газообразная одновременно присутствует в большинстве газово-жидких включений в бериллах.

Таким образом, в переносе и отложении компонентов нерастворимых в воде минералов, в том числе и берилла, принимали участие галогениды щелочей и углекислота и, по-видимому, этот перенос осуществлялся в комплексной форме, поскольку любой из компонентов берилла Be, Al и Si легко комплексуются.

Отсутствие зональности по химическому составу и физическим свойствам в бериллах из занорышей пегматитов, правильная форма отрицательных кристаллов на газово-жидких включениях в них говорят о сохранении состава минералообразующей среды во время кристаллизации берилла неизменной. Кристаллизация осуществлялась в результате плавного и нерезкого снижения температуры. Правильная (полосчатая) зональность по составу и свойствам на многих кристаллах из гидротермально-пневматолитовых месторождений говорит о пульсирующем характере изменения состава минералообразующих растворов.

Плоскости с неровными границами зональности в метасоматических кристаллах берилла говорят о неустановившемся, меняющемся во времени и пространстве режиме кристаллизации.

Проведенное нами и другими исследователями изучение морфологии бериллов, обусловленной процессами растворения, указывает на чуждость берилла в сильноокислых и сильнощелочных растворах, растворение его или замещение другими минералами.

Обработка данных микроскопических исследований скульптур роста позволила также получить сведения об условиях кристаллизации берилла. А. Варма (1958) считает возможным образование природных бериллов при 80°C , что сомнительно. Гриффин (Griffin, 1951) подсчитал для изучаемых им кристаллов берилла, что пересыщение при росте их составляло 0,15%.

Помимо этих данных, выраженных в общих цифрах, полезно привести общегеологические, геохимические и парагенетические данные, позволяющие косвенно судить об условиях образования берилла.

Парагенезис берилла проливает свет на общий характер химизма среды, в которой кристаллизовался берилл. Данные о типичных парагенезисах берилла сведены в табл. 1 и более расширенные сведения можно найти в обобщающих работах (Ферсман, 1940; Беус, 1960; Власов и Кутукова, 1960; Беус и др., 1962).

Здесь мы хотим привести необычные указания, расширяющие наши сведения о парагенезисе берилла и обстановке его нахождения. Палач (Palache, 1934) описал розовый берилл в пустотах в риолите. Он считает его происхождение за счет дифференциации летучих в лаве.

В кварцевых жилах среди кварцевых монзонитов берилл зеленого и голубого цвета ассоциируется с серицитом и молибденитом (Landes, 1934).

Фемистер (Phemister, 1940) отмечает совместное нахождение берилла и бертрайдита в жильной породе, содержащей кварц, хлорит, турмалин, ортоклаз, флюорит, касситерит, апатит.

На совместное нахождение берилла с гельвином в доломитизированном известняке из Новой Мексики указывает Холсер (Holser, 1953). Метаморфический парагенезис изумруда и аквамарина характерен для месторождения Хабахталь в биотитовых сланцах (Gubelin, 1956). В Родезии Губелин (Gubelin, 1958) описывает берилл в измененных перидотитах (тримолитовые сланцы). Согласно Диру, Хови и Цузмену (Deer, Howie and Zussman, 1962), берилл, кроме обычных условий, может быть найден в нефелиновых сиенитах (?), слюдяных сланцах и мраморе.

Берилл как наиболее устойчивый в широком диапазоне условий бериллиевый минерал, содержащий, кроме Ве, широко распространенные элементы: Si, Al и O, получил в природе наибольшее распространение. В большинстве природных процессов, где проявляется повышенная концентрация бериллия, он отлагается в виде минерала берилла. Однако это не всегда так.

По данным Гольдшмидта и Петерса (Goldschmidt, Peters, 1932), содержание бериллия в нефелиновых сиенитах в 10 раз больше, чем в гранитах, однако в месторождениях, связанных генетически со вторыми, берилл развит широко, а в месторождениях, связанных с первым, он неизвестен.

Исследования А. А. Беуса (1960) также говорят о повышенной концентрации бериллия в нефелиновых сиенитах. Правда, Вашингтон (Washington, 1931) пришел к выводу, что в нефелиновых сиенитах, содержащих повышенное количество Ве, последний может входить в состав берилла, который ошибочно принимается за нефелин и пропускается в прозрачных шлифах. Это утверждение, по-видимому, ошибочно. Берилл в нефелиновых сиенитах еще никем не был найден и описан. По-видимому, высокая щелочность процессов формирования массивов нефелиновых сиенитов делает берилл неустойчивым как в магматический, так и

в постмагматический период. Проявление кислых растворов иногда в постмагматический период в щелочных породах оставляет некоторую возможность для образования берилла.

А. А. Беус и др. (1963) справедливо отмечают, что «наличие собственных минералов бериллия в гранитах, не затронутых процессами постмагматического изменения, до настоящего времени не доказано». Берилл выделяется в пегматитах, имеющих повышенное по сравнению с гранитами содержание бериллия.

Работами А. А. Беуса (1956) показана высокая концентрация бериллия в гидротермально-пневматолитовом процессе. В последнее время найдены новые типы крупных промышленных месторождений берилла гидротермально-пневматолитового типа, превышающие по значению пегматитовые месторождения.

Елзер (Uelzer, 1933) считает, что в бедных алюминием породах образуется гелиолин, а в богатых алюминием — берилл.

К этому необходимо добавить при выделении гельвина обязательное присутствие серы и обогащение растворов железом и марганцем. Для фенакита, по-видимому, характерно обеднение растворов как алюминием, так и кремнием по сравнению с растворами, отлагающими берилл.

Роль летучих в процессе и концентрации редких элементов, в том числе бериллия с последующей кристаллизацией в виде минералов бериллия, и в частности берилла, издавна подчеркивалась (Harker, 1909, Ферсман, 1940). К. А. Власов (1936, 1938, 1956) отводил ведущее место летучим эманациям особенно фтору, выполняющим каталитическую, минерализующую роль, в процессе формирования редкометалльных месторождений и особенно в концентрации бериллия и выделении берилла. Эту идею развивали и ранее (Élie de Beaumont, 1847; Harker, 1909).

Как дальнейшее развитие этих взглядов в последнее время широкое признание получил, благодаря в основном работам А. А. Беуса и других (Беус, 1958; Беус, Соболев, 1962; Соболев, 1962), способ переноса редких элементов в постмагматических процессах в форме комплексных соединений. Всесторонние исследования берилла подтверждают это положение. Впервые на высокую роль комплексных соединений в переносе редких элементов указывал А. Е. Ферсман (1933).

Помимо подвижных летучих соединений, и другие факторы могут влиять на перенос и концентрацию бериллия и отложение берилла (Власов, 1956; Беус, 1960; 1961; Гинзбург, 1961), в особенности режим кислотности-щелочности в постмагматическом процессе.

Заключение

Мы видим, как много исследований было специально посвящено бериллу. Этот минерал, по нашему мнению, и в будущем должен привлекать внимание многих, так как он стоит на пересечении многих проблем геологии, минералогии, геохимии и кристаллографии.

Мы затронули лишь одну сторону — строение кристаллов — этого многогранного минерала, но и в этом вопросе остается много неясного, спорного и неисследованного.

Какие стороны вопроса, по нашему мнению, нуждаются в дальнейшей особенно углубленной разработке.

1. Определение прямыми методами (инфракрасная спектроскопия, парамагнитный и ядерный резонанс и др.) точного положения различных атомов и молекул (щелочных, щелочноземельных, инертных элементов, воды и др.) в структуре берилла.

2. Определение путем синтеза предельного вхождения в структуру берилла различных примесей и соответствующих условий, способствующих этому.

3. Более тщательное исследование особенностей химического состава бериллов из непегматитовых месторождений (к настоящему времени абсолютное большинство полных химических анализов выполнено на бериллах из пегматитов).

4. Исследование зависимости размеров элементарной ячейки берилла от вхождения других примесей, кроме щелочей.

5. Всестороннее исследование химического состава водных растворов, газовой фазы и минералов-узников газовой-жидких и многофазных включений в кристаллах берилла из различных типов месторождений.

6. Исследование закономерностей морфологии роста и растворения синтетических кристаллов берилла.

7. Всестороннее исследование механических свойств берилла: твердости, характера спайности, излома, хрупкости, пластичности.

8. Всестороннее исследование электрических, магнитных свойств (диэлектрическая проницаемость, магнитная восприимчивость, парамагнитный резонанс и др.) бериллов.

9. Исследование изменения строения и свойств берилла в результате облучения (рентгеновское, радиоактивное облучение, люминесценция и т. п.).

10. Дальнейшее исследование взаимосвязи и взаимозависимости строения, свойств, состава и условий образования берилла.

Литература

- Абдулгафаров К. К., Чердынцев В. В. Исследование выделения радиоактивных эманаций и гелия из природных материалов в зависимости от температуры.— Изв. Высших учебных завед., Геол. и разведка, 1958, № 9.
- Аверьянова И. М. К минералогии процессов изменения берилла. В кн.: «Материалы по минералогии Кольского полуострова», т. 2. Апатиты, 1962.
- Агафонова Т. Н. Химический состав и окраска турмалинов Борщевочного кряжа.— Докл. АН СССР, 1947, 33, № 9.
- Бакакин В. В., Белов В. В. Кристаллохимия берилла.— Геохимия, 1962, № 5.
- Бацанов С. С. Структурная рефрактометрия. М., 1959.
- Белов Н. В. и Тархова Т. Н. Кристаллическая структура миларита.— Труды Ин-та кристаллогр. АН СССР, 1951, вып. 6.
- Белов Н. В. и Матвеева Р. Г. Определение параметров структуры берилла методом частичных проекций. Там же.
- Белов Н. В. Очерки по структурной минералогии.— Минер. сб. Львовск. геол. об-ва, 1951, № 5; 1955, № 9; 1956, № 10.
- Белов Н. В. Развернутые формулы берилла.— Геохимия, 1959, № 8.
- Белов Н. В. По поводу работы А. А. Беуса «О положении щелочных металлов в структуре берилла».— Геохимия, 1959, № 3.
- Бетехтин А. Г. Минералогия. М., 1950.
- Беус А. А. Геохимия бериллия.— Геохимия, 1956, № 5.
- Беус А. А. Бериллий. Оценка месторождений при поисках и разведке. Госгеолтехиздат, 1956.
- Беус А. А. Роль комплексных соединений в переносе и концентрации редких элементов в эндогенных растворах.— Геохимия, 1958, № 4.
- Беус А. А. О зависимости между содержанием лития, натрия, цезия в щелочных бериллах.— Геохимия, 1959, № 8.
- Беус А. А. О положении щелочных металлов в структуре берилла.— Геохимия, 1959, № 3.
- Беус А. А. Геохимия бериллия и генетические типы бериллиевых месторождений. М., 1960.
- Беус А. А. Геохимия грейзеновых месторождений и закономерности распространения в них редких элементов. В кн.: «Международ. геол. конф., XXI сессия. Докл. сов. геологов». Изд-во АН СССР, 1960.
- Беус А. А. Режим кислотности — щелочности в процессах метасоматоза как фактор переноса и концентрации редких элементов. В сб.: «К 60-летию акад. Д. С. Коржинского». Изд-во АН СССР, 1961.
- Беус А. А. Геохимические закономерности концентрации редких элементов в связи с процессом послемагматического метасоматоза. В кн.: «Альбитизированные и грейзенизированные граниты — новый перспективный тип месторождений редких элементов». М., 1961.
- Беус А. А. О механизме образования идиоморфных кристаллов редкометалльных минералов в процессах замещения.— Труды ИМГРЭ АН СССР, 1961, вып. 7.
- Беус А. А., Залашкова Н. Е. О генезисе натриевой модификации берилла в гранитных пегматитах.— Минер. сб. Львовск. геол. об-ва, 1956, № 10.
- Беус А. А. и Ситнин А. А. Бериллсодержащие граниты. В кн.: «Геология месторождений редких элементов», вып. 4. М., 1959.
- Беус А. А., Ситнин А. А. Нормальные альбитизированные и грейзенизированные граниты с редкометалльным оруденением. В кн.: «Альбитизированные и грейзенизированные граниты — новый перспективный тип месторождений редких элементов». М., 1961.
- Беус А. А., Соболев Б. П. О галлоидном переносе элементов в эндогенных процессах. В кн.: «Экспериментальные исследования в области глубинных процессов». Изд-во АН СССР, 1962.
- Беус А. А., Соболев Б. П., Диков Ю. П. К геохимической истории бериллия в процессах высокотемпературного послемагматического минералообразования.— Геохимия, 1961, № 3.
- Боровик С. А. Лабораторные опыты введения скандия в кристаллическую решетку берилла.— Докл. АН СССР, 1946, 53, № 1.

- Боровик С. А. О содержании скандия в бериллах и некоторых других минералах.— Докл. АН СССР, 1943, 40, № 125.
- Боровик-Романова Т. Ф. и Соседко А. Ф. Содержание редких щелочей в минералах из пегматитовых жил Кольского полуострова по спектральным анализам.— Геохимия, 1957, № 5.
- Бурксер Е. С., Капустин Н. П., Кандагури В. В. Гелий, радий и торий в бериллиевых минералах СССР.— Докл. АН СССР, 1937, 15, № 4.
- Варма А. Рост кристаллов и дислокации. М., ИЛ, 1958.
- Возбуждкий Г. Л. Скульптура поверхности кристаллов берилла. В кн.: «Кристаллография», вып. 5. М., 1956.
- Вернадский В. И. О воровбевите и химическом составе бериллов.— Труды Геол. музея Академии наук, 1908, 2, вып. 5.
- Виноградов Г. Ф. Про зміну деяких фізичних властивостей берилів при нагріванні Студ. наук проці. Київськ. ун-ту, 1956, 19, 36.
- Винчелл А. Н. и Винчелл Г. Оптическая минералогия. М., ИЛ, 1953.
- Власов К. А. Генезис изумрудов.— Природа, 1936, № 8.
- Власов К. А. Месторождение берилла изумрудных копей. В кн.: «Сб. научных работ комсомольцев АН СССР». М.—Л., 1936.
- Власов К. А. О теории десиликации гранитных пегматитов.— Изв. АН СССР, серия геол., 1938, № 2.
- Власов К. А. Каталитическая роль фтора в процессе десиликации пегматита и генезиса берилла.— Труды Ломоносовск. ин-та геохимии, кристаллогр. и минер. АН СССР, 1938, вып. 9.
- Власов К. А. Эманационный процесс и кристаллизационная дифференциация как ведущие факторы образования ряда месторождений редких элементов. В кн.: «Вопросы геохимии и минералогии». М., 1956.
- Гаврусевич Б. А., Сарапулов Ф. Я. К вопросу об изменении окраски и оптических свойств бериллов при нагревании.— Докл. АН СССР, 1941, 31, № 8.
- Гаврусевич Б. О. Про причини забарвлення берилів в изумрудних копальнях на Уралі.— Наукові зап. КДУ, 1946, 5, вып. 1.
- Герлинг Э. К., Полканов А. А. Проблема абсолютного возраста докембрия Балтийского щита.— Геохимия, 1958, № 8.
- Гинзбург А. И. О минералах — геохимических индикаторах и их значении при поисках руд редких металлов в пегматитах.— Труды Минер. музея АН СССР, 1952, вып. 3.
- Гинзбург А. И. К вопросу о химическом составе берилла.— Труды Минер. музея АН СССР, 1955, вып. 7.
- Гинзбург А. И. Пневматолито-гидротермальные месторождения бериллия. В кн.: «Геология месторождений редких элементов», 1959, вып. 4.
- Гинзбург А. И. Факторы, благоприятствующие концентрации редких элементов. В кн.: «Геология месторождений редких элементов», вып. 14, Госгеолтехиздат, 1961.
- Григорьев Д. П. К вопросу о различии первичных и вторичных жидких включений в минералах.— Минер. сб. Львовск. геол. об-ва, 1948, № 2.
- Грум-Гржимайло С. В. Об окраске минералов, вызываемой хромом.— Труды Кристаллогр. лабор. АН СССР, 1940, вып. 2.
- Грум-Гржимайло С. В. Розовая окраска турмалинов.— Докл. АН СССР, 1948, 10, № 8.
- Грум-Гржимайло С. В. Об окраске турмалинов и их исследовании в ультрафиолетовом и поляризованном свете.— Труды Ин-та кристаллогр. АН СССР, 1956, вып. 12.
- Грум-Гржимайло С. В. Окраска самоцветов.— Записки Всес. минер. об-ва, 1958, 37, вып. 2.
- Грум-Гржимайло С. В., Аникина А. И., Белова Е. Н. и Толстихина К. И. Кривые спектрального поглощения и другие физические константы природных слюд.— Минер. сб. Львовск. геол. об-ва, 1952, № 9.
- Грум-Гржимайло С. В., Певнева Л. А. Кривые спектрального поглощения бериллов и топазов различных окрасок.— Труды Ин-та кристаллогр. АН СССР, 1956, вып. 12.
- Гогоберидзе Д. В. Штриховка на гранях кристаллов.— Природа, 1948, № 4.
- Гольдшмидт В. М., Петерс К. К. К геохимии бериллия. В кн.: «Сб. статей по редким элементам». М.—Л., ГОНТИ, 1938.
- Дилакторский Н. Л. Об изменении бериллов при высоких температурах.— Изв. Всес. геол.-развед. объедин., 1931, 50, вып. 85.
- Долово-Добровольский В. В. Кристаллы берилла в связи с общими вопросами классификации внешних форм кристаллов минеральных месторождений.— Труды ЦНИГРИ, 1936, вып. 64.
- Дорфман М. Д. К вопросу об определении генезиса берилла.— Докл. АН СССР, 1952, 82, № 4.
- Драверт П. Протоколы Казанского общества естествоиспытателей, XXXIV, 1904 (Приложение № 215).

- Дядькина М. Я. Особенности формирования берилла в пегматитовых жилах.— Записки Всес. минер. об-ва, 1962, **92**, вып. 2.
- Еремеев П. В. Сообщение о кристаллах берилла.— Записки Минер. об-ва, 1893, ч. 33, вып. 1.
- Еремеев П. В. О внутреннем строении аквамарина из Тигеречских белков на Алтае.— Записки Минер. об-ва, 1893, ч. 35.
- Еремеев П. В. Об особенностях во внутреннем строении берилла из Уральских месторождений и с Алтая.— Записки Минер. об-ва, 1898, ч. 35.
- Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Харьков, 1950.
- Заболотная Н. П. и М. И. Новикова. Бериллоносные зоны в гранодиоритах. В кн.: «Геология месторождений редких элементов», вып. 4. М., 1959.
- Землячченский П. А. Изумруд и берилл Уральских изумрудных копей.— Труды СПб. об-ва естествоиспыт., отд. геол. и минер., 1900, **29**, вып. 5.
- Ибадуллаев С. И. О натровом берилле одного из пегматитовых полей.— Узбек. геол. журнал, 1958, № 2.
- Ивантишин и др. Пьезооптические пегматиты Волини. Киев, 1957.
- Икорникова Н. Ю. Кристаллографическое исследование кристаллов бериллов Шерловой горы.— Записки Всес. минер. об-ва, 1939, **68**, вып. 4.
- Каменцев И. Е. Срастание кварца и аквамарина.— Записки Всес. минер. об-ва, 1963, **92**, вып. 1.
- Карножицкий А. Н. Об оптической аномалии берилла.— Записки Минер. об-ва, 1891, ч. 27.
- Карножицкий А. Н. Евгение-Максимильяновские копи и некоторые другие новые малоисследованные месторождения минералов в области Среднего Урала.— Записки Минер. об-ва, 1895, ч. 34, вып. 1.
- Карножицкий А. Н. О соотношении между окраской и оптической аномалией кристаллов.— Записки Минер. об-ва, геол. серия, 1898, ч. 35.
- Кляя М. О. Некоторые вопросы образования жидких включений в кристаллах. М., 1952.
- Кокшаров Н. И. Материалы для минералогии России. Берилл.— Горный журнал, 1854, ч. 1.
- Кокшаров Н. И. О некоторых формах берилла с весьма сложными кристаллографическими знаками.— Записки Минер. об-ва, 1872, вып. 7.
- Кузнецов В. Д. Кристаллы и кристаллизация. Гостехтеоретиздат, 1953.
- Кузнецов Е. А., Ли Чжао-ли. Дисперсия двупреломления, химический состав и структура бериллов.— Вестник МГУ, 1960, № 6.
- Кузнецова Е. В. Материалы по пегматитовым жилам Дзиркульского массива в Закавказье.— Изв. ВГРО, 1931, **1**, вып. 98.
- Курбатов С. С. Материалы к минералогии пегматитовых жил Алтын-Тау (1 пегматитовая жила).— Труды Таджикско-Памирской экспедиции, 1935, вып. 41.
- Курбатов И. и Каргин В. Об изменении зеленой окраски берилла в голубую.— Природа, 1927, № 7—8.
- Леммлейн Г. Г. О соотношении современного и первоначального объемов жидких включений в минералах.— Докл. АН СССР, 1950, **22**, № 4.
- Леммлейн Г. Г. Процесс залечивания трещины в кристалле и преобразования формы полостей вторичных жидких включений.— Докл. АН СССР, 1951, **28**, № 4.
- Леммлейн Г. Г. К теории залечивания трещин в кристалле и о равновесной форме отрицательного кристалла.— Докл. АН СССР, 1953, **39**, № 2.
- Леммлейн Г. Г. и Кляя М. О. Особенности залечивания трещины в кристалле в режиме снижающейся температуры.— Докл. АН СССР, 1952, **37**, № 6.
- Лоскутов А. В. О процессе залечивания трещин в кристаллах кварца.— Труды Научно-исслед. ин-та геол. Арктики, 1959, **96**, вып. 8.
- Матвеев К. К. К вопросу о строении и росте поперечно-полосатых кристаллов берилла.— Труды Горно-геол. ин-та Уральск. фил. АН СССР, 1955, вып. 26, № 3.
- Матвеев В. В. О находке бавенита в пегматитах Кольского полуострова.— Материалы по минер. Кольского полуострова, 1959, **1**.
- Михеев В. И., Шафрановский И. И. Реберные формы и штриховка на кристаллах.— Кристаллография, 1957, **2**, вып. 1.
- Ненадкевич К. А. Материалы к познанию химического состава минералов в России. VI. Цезиевый берилл. Воробьевит.— Труды Геол. музея Академии наук, 1911, **5**.
- Никитин В. Д. Особенности процессов формирования минералов при метасоматических явлениях. В кн.: «Кристаллография», вып. 4. Изд-во ЛГУ, 1955.
- Оппенгейм В. Изумрудноносная зона в Колумбии. В сб.: «Редкие элементы». Бериллий, вып. 3, 1955.
- Павлович С., Николић, Д. Р. Промене берилла над действием теплоте «Глас. Српска АН», 1960.
- Соболев Б. П. Роль комплексных фтористых соединений в переносе и концентрации бериллия в высокотемпературных процессах минералообразования (экспериментальное исследование). М., 1962.
- Ситнин А. А. и Сажина Л. И. О содержании рублидия в бериллах.— Труды ИМГРЭ АН СССР, 1959, вып. 2.

- Солодов Н. А. Внутреннее строение и геохимия редкометалльных гранитных пегматов. Изд-во АН СССР, 1962.
- Соседко Т. А. Изменение структуры и свойств в бериллах с повышенным содержанием щелочей.— Записки Всес. минер. об-ва, 1937, 86, вып. 4.
- Спицин В. И. Современное развитие периодического закона Д. И. Менделеева. В сб.: «Дмитрий Иванович Менделеев. Жизнь и труды». Изд-во АН СССР, 1957.
- Сушинский П. П. Об аквамарине с Шерловой горы в Забайкальской области.— Изв. Донского политехн. ин-та, 1923, ч. 8.
- Сушинский П. П. Аквамарин с Шерловой горы в Забайкальской области.— Изв. Донского политехн. ин-та, 1928, ч. 10.
- Татаринов П. М. Слюды СССР. Л.— М., 1937.
- Тимченко Т. И. Процессы изменения берилла в пегматитах Восточного Забайкалья.— Труды Минер. музея АН СССР, 1959, вып. 9.
- Фекличев В. Г. Морфология гранных микроскультур кристаллов берилла. Конференция молодых научных сотрудников ИМГРЭ АН СССР. Тезисы докладов. М., 1959.
- Фекличев В. Г. О криволинейной штриховке на гранях призмы $\{10\bar{1}0\}$ кристаллов берилла. Вторая конференция молодых научных сотрудников ИМГРЭ АН СССР. Тезисы докладов. М., 1960.
- Фекличев В. Г. О колебательной штриховке на гранях призмы $\{10\bar{1}0\}$ кристаллов берилла.— Труды ИМГРЭ АН СССР, 1961, вып. 7.
- Фекличев В. Г. Исследование зональных кристаллов берилла из занорышей пегматов.— Труды ИМГРЭ АН СССР, 1962, вып. 8.
- Фекличев В. Г. Микроструктуроморфологическое исследование явлений растворения кристаллов берилла.— Труды ИМГРЭ, 1963, вып. 18.
- Фекличев В. Г. О химическом составе минералов группы берилла, характере изоморфизма и положении в кристаллической структуре главных примесей.— Геохимия, 1963, № 4.
- Ферсман А. Е. Драгоценные и цветные камни России, т. 1. Пг., 1922.
- Ферсман А. Е. Драгоценные и цветные камни СССР, т. 2. Л., 1925.
- Ферсман А. Е. Происхождение изумрудных копей на Урале.— Докл. АН СССР, серия А, 1925.
- Ферсман А. Е. Геохимия, изд. 2, т. 1—4. 1933—1939.
- Ферсман А. Е. Пегматиты, т. 1. Изд-во АН СССР, 1940.
- Ферсман А. Е. Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых. М.— Л., 1940.
- Ферсман А. Е. Элементы разграничения двух одновременно кристаллизующихся веществ. Избр. труды, т. 1. М., 1952.
- Франк-Каменецкий В. А., Соседко Т. А. О характеристике изоморфизма в щелочных бериллах.— Докл. АН СССР, 1958, 118, № 4.
- Франк-Каменецкий В. А. По поводу дискуссии о положении щелочных металлов в структуре берилла.— Геохимия, вып. 7, 1959.
- Хлопин В. Г. К вопросу об определении абсолютного геологического возраста по галиевому методу в нерадиоактивных минералах с плоской кристаллической упаковкой.— Докл. АН СССР, 1949, 69, № 6.
- Хлопин В. Г. и Абишев Ш. А. Радиоактивность и содержание гелия в бериллиевых, борных и литиевых минералах СССР.— Докл. АН СССР, 1941, 32, № 9.
- Чердынцев В. В. и Казак Л. В. О происхождении избыточного гелия в некоторых минералах.— Докл. АН СССР, 1949, 69, № 6.
- Чернышкова Л. П. Геологические особенности пегматитов Волины, их морфология и внутреннее строение.— Труды ВНИИП, 1957, 1, вып. 1.
- Червинский П. Н. Искусственное получение минералов в XIX столетии. Киев, 1903—1905.
- Шавло С. Г. Пегматиты и гидротермалиты Калбинского хребта. Алма-Ата, 1958.
- Шафрановский И. И. Кристаллы минералов. Кривогранные, скелетные и зернистые формы. М., 1961.
- Шерстюк А. И. О влиянии изоморфных примесей в берилле на его показатели преломления.— Научные докл. высшей школы, Геол.-геогр. науки, 1958, № 2.
- Шибольд Э. Структура силикатов. В сб. переводов: «Основные идеи геохимии», вып. 3. Л., 1937.
- Шубников Н. В. Образование кристаллов. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1947.
- Шефталъ Н. Н. Аксессуары роста кристаллов.— Труды Ин-та кристаллогр. АН СССР, 1947, вып. 3.
- Щербаков Д. И. Генетические типы бериллиевых месторождений СССР.— Редкие металлы, 1926, № 1.
- Яковлева М. Е. Процессы изменения берилла.— Труды Минер. музея АН СССР, 1961, вып. 12.
- Adams I. W. Beryllium deposits of the Mount Antero region, Chaffee County, Colorado.— U. S. Geol. Survey Bull., 1953, 982-D.
- Anderson B. W. Igemerald—the German synthetic emerald.— Gemmologist, 1935, 4.

- Anderson B. W. Gemstones and spectroscopy. The absorption spectra of emerald and alexandrite.—*Gems and Gemmology*, 1950, 6.
- Armstutz A., Borloz A. *Arch. Sci. phys-natur.*, 17 suppl., 1935.
- Artini E., Rend. R. Accad. Lincei Roma, 1915, 24.
- Bauer-Schlossmacher M. *Edelstein-Kunde*, 1932.
- Beer V. Beobachtungen an pleochromatischen Krystallen.—*Poggend. Ann.*, 1851, 82.
- Bergerhof G., Nowacki W. Über die Kristallstruktur des Bazzits und ihre Beziehungene zu der des Beryll.—*Schweiz. mineral. und petrogr. Mitt.*, 1955, 35.
- Bernauer F. Die Sog. Smaragddrillinge von Muso und ihre optischen Anomalien.—*Neues Jahrb. Mineral., Abt. A*, 1926, 54.
- Bertalani M. Rare earths in the bazzite of Baveno.—*Rend. Soc. mineral. ital.*, 1948, 5.
- Bertrand E. Note sur les houppes que présentent les cristaux à un axe optique.—*J. phys.*, 1879, 8.
- Bolman T. Insluitsels in smaragd von Muzo-Columbia.—*Geol. en mijnbouw*, 1940, 2.
- Böse R. Optische und spektrographische Untersuchungen an Beryllen, insbesondere bei höheren Temperaturen.—*Neues Jahrb. Mineral., Abt. A*, 1936, 70, H. 3.
- Bowley H. Beryl.—*Amer. Rept. Govt. Mineralogist, Analyst and Chemist. West. Austral.*, 1945, 1948.
- Bragg W. L., West J. The structure of beryl $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$.—*Proc. Roy. Soc., London. Ser. A*, 1926, 111.
- Bragg W. L. The structure of silicates.—*Z. Kristall.*, 1930, 74, H. 3/4.
- Brauns R. *Optische Anomalien der Krystall*. Leipzig, 1891.
- Brewster D. On the phenomenon of luminous rings in calcareous spar and beryl, as produced by cavities containing the two new fluids.—*Philos. Mag., Ser. 3*, 1848, 33.
- Burton W. K., Cabrera N., Frank F. C. *Nature*, 1949, 163.
- Burton W. K., Cabrera N., Frank F. C. The growth of crystals and the equilibrium structure of their surfaces.—*Philos. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A*, 1951, 243, № 866.
- Cameron E. N., Rowe R. B., Weis P. L. Fluid inclusions in beryl and quartz from pegmatites of the Middltown Distr.—*Conn. Amer. Mineralogist*, 1953, 38, № 3-4.
- Cerny P. Bavenit a sružené nerosty z Drahoňín.—*Časop. mineral. Geol.* 1956, 1, čís. 2.
- Čech F. Bavenit z Maršikova. *Přirodoved. sbor.—Ostravského kraje*, 18, 1957, čís. 2.
- Chudoba K. F. *Dtsch.—Goldschmiede Ztg.*, 1956, 54, H. 2.
- Claffy E. W. Composition, tenebrescence and luminescence of Spodumene minerals.—*Amer. Mineralogist*, 1953, 38, № 11-12.
- Crane H. R., Lauritsen C. C. Masses of Be^8 , Be^9 and Be^{11} .—*Phys. Rev.*, 1935, 47.
- Crookshank H. *Trans. Mining Geol. and Metallurg.—Inst. India*, 1948, 42.
- Dake H. C. Rare smoky beryl.—*Mineralogist*, 1954, 22, № 1.
- Damon P. E., Kulp L. I. Excess helium and argon in beryl and other minerals.—*Amer. Mineralogist*, 1958, 43, № 5/6.
- Dave A. S. On the occurrence of beryl in Madhya Pradesh. Kilpady Sripad Rao.—*Univ. Geol. Soc., Nagpur*, 1954—1955, 1, № 2.
- Deer W. A., Howie R. A., Zussman T. *Rockforming minerals*, v. I. London, 1962.
- Doelter C. *Die Farben der Mineralien*. Braunschweig, 1915.
- Doelter C. *Handbuch der Mineralchemie*. Bd II, Tl. 2, 1917.
- Duparc L., Wunder M., Sabot R. Les minéraux des pegmatites des environs d'ant-sirabé à Madagascar.—*Mém. Soc. phys. histoire natur. Genève*, 1910, 36.
- Duparc L., Wunder M., Sabot R. Contribution à la connaissance des minéraux des pegmatites. Beryl de Maharitra.—*Bull. Soc. franç. minéral.*, 1911, 34, № 4.
- Ebelmen J. J. Mémoire sur une nouvelle méthode pour obtenir des combinaisons cristallisées par la voie sèche, et sur des applications à la reproduction des espèces minérales.—*Ann. chim. phys.*, 1848, 22, № 3.
- Élie de Beaumont. Note sur les émanations volcaniques et métallifères.—*Bull. Soc. géol. France* (2), 1847, 4.
- Eppler W. F. Notes on asterism in corundum, rose quartz and almandine garnet and chatoyancy in beryl.—*J. Gemmology*, 1958, 6.
- Eppler W. F. Synthetic emerald.—*J. Gemmology*, 1958, 3.
- Eppler W. F. Ungewöhnliche Kristall-Einschlüsse.—*Dtsch. Goldschmiede-Ztg*, 1961, 1.
- Eppler W. F. Grows marks in emerald.—*J. Gemmology*, 1961, № 2.
- Espig H. Der synthetische Smaragd.—*Z. Kristallogr.*, 1935, 92.
- Fay J. W. J., Glückave E., Paueth F. A. On the occurrence of helium in beryls.—*Proc. Roy. Soc. London. Ser. A*, 1938, 165.
- Folinsbee E. R. Optic properties of cordierite in relation to alkalies in the cordierite—beryl structure.—*Amer. Mineralogist*, 1941, 26, № 8.
- Ford W. E. Einige interessante Beryllkrystalle und deren Beglieter.—*Z. Kristallogr.*, 1907, 13, H. 1.
- Ford W. E. Über den Einfluß der Gegenwart von Alkalien in Beryll auf dessen optische Eigenschaften. *Groft.—Z. Kristallogr.*, 1910, 48.
- Fron del C. Effect of heat on the colour of beryl.—*Gemmologist*, 1952, 21.

- Gogers A. F., Sperisen F. T. American synthetic emerald.—*Amer. Mineralogist*, 1942, 27, № 11.
- Goldschmidt V. Atlas der Krystallformen, Bd. 1. 1913.
- Goldschmidt V. M., Peters C. Zur geochemie des Berylliums.—*Abchr. Ges. Wiss. Gottingen, Math-Physik. Kl.*, 1932.
- Goldschmidt V. M. Geochemistry. Oxford, 1954.
- Goldwin F. E. Maser action in emerald.—*J. Appl. Phys.*, 1961, 32, № 8.
- Gossner B., Musgnug F. Vergleichende röntgenographische Untersuchung von Magnesiumsilikaten.—*Neues Jahrb. Mineral., Abt. A.*, 1928, 58.
- Grattarola G. Sopra und nuova varietà (rosterite) del berillo elbano.—*Riv. sci. ind.*, 1880, 12.
- Greilich. Krystallographisch-optische Untersuchungen. Wien—Olmus, 1858.
- Griffin L. J. Observation of unimolecular growth steps on crystal surfaces.—*Philos. Mag.*, 1950, 41, № 313.
- Griffin L. J. Microscopic studies on beryl crystals. I. Observation of uni-molecular-steps.—*Philos. Mag., Ser. 7*, 1951, 42.
- Gubelin E. J. Some additional notes on Indian emeralds.—*Gems and Gemmology*, 1951, 7.
- Gubelin E. J. Emerald from Habachtal.—*J. Gemmology*, 1956, 5.
- Gubelin E. J. Emerald from Sandwana.—*J. Gemmology*, 1958, 6.
- Gubelin E. J. More light on beryls and rubies with synthetic overgrowth.—*Gems and Gemmology*, 1960—1961, 10, № 4.
- Hautefenille P., Parrey A. Sur la reproduction de la phénacite et de l'émerande.—*C. r., Acad. sci., cVI*, 1888.
- Hayton T. D. Pink beryl from Western Australia.—*Rept. Govt Chem. Lab. West. Austral.* 1947, 1950.
- Harker A. Natural history of igneous rocks. 1909.
- Hermann W. Über die Einwirkung oxydierender und reduzierender Gase auf die Färbung einiger Minerale.—*Z. anorgan. Chem.*, 1908, 60.
- Hintze C. Handbuch der Mineralogie, Bd II. 1897.
- Himmel H., Schmidt-Zittel H. Wachstumsakzessorien am Beryl.—*Zbl. Mineral., Abt. A.*, 1927.
- Holser W. T. Beryllium minerals in the Victorio Mountains, Luna County, New Mexico.—*Amer. Min.*, 1953, 38.
- Huttenlocher H., Hügi Th., Nowacki W. Röntgenographische und spektrographische Untersuchungen an Bazzit.—*Schweiz. mineral., und petrogr. Mitt.*, 1954, 34.
- Hurbut C. S. jr., Wenden H. E. Beryl at Mount Mica, Maine.—*Amer. Min.*, 1951, 36.
- Ingerson E. Liquid inclusions in Geologic thermometry.—*Amer. Min.*, 1947, 32, Nos 7 and 8.
- Jacob T. Drei Analysen von Beryll.—*Schweiz. mineral. und petrogr.—Mitt.*, 1938, 18, № 2.
- Jaeger M., Espig H. Der synthetische smaragd. Dtsch.—*Goldschmiede Ztg*, 1935, 38.
- Jayaraman N. A chemical study of the Mellore beryl and the cause of its colouration.—*J. Indian Inst. Sci. A*, 1940, 23.
- Kerr P. F. Kaolinite after beryl from Alto do Giz, Brasil.—*Amer. Min.*, 1946, 31, № 9-10.
- Klang H. Beiträge zur Kenntnis der Absorption und Lichtbrechung von Aquamarin und einigen gelben und grünen Beryllen.—*Neues Jahrb. Mineral., Abt. A.*, 1934, 69.
- Kleeman A. W. On the analysis of beryl from Boolcoomata, South Australia.—*Trans. Roy. Soc. S. Austral.*, 1944, 68.
- Koenigsberger I. Über die Absorption von ultraroten und ultravioletten Strahlen in doppelbrechenden Krystallen. Inaugural-Dissertation, 1897.
- Kokscharov N. Materialien zur Miner Rußlands, Bd I—IV. 1853, 1858, 1862.
- Kolbe E. Über die Färbung von Mineralien durch Mangan, Chrom und Eisen.—*Neues Jahrb. Mineral., Abt. A., Bei-Bd* 1935, 69.
- Kulakon R. Wisconsin Eng., 1956, 60, № 6.
- Lacroix A. Nouvelles observations sur les minéraux des pegmatites de Madagascar.—*Bull. Soc. franç. mineral.*, 1910, 33.
- Lacroix A. Note complémentaire sur le beryl de Madagascar.—*Bull. Soc. franç. mineral.*, 1911, 34, № 5.
- Lacroix A. Sur les propriétés optiques des beryls roses de Madagascar.—*Bull. Soc. franç. Mineral.*, 1911, 34, № 3.
- Laemmlein G. G. Sekundäre Flüssigkeitseinschlüsse in Mineralien.—*Z. Kristallogr.*, 1929, 71, H. 3.
- Landes K. K. The beryl-molybdenite deposit of Chaffee County, Colorado.—*Econ. Geol.*, 1934, 29, № 7.
- Lea I. Further notes on «inclusions» in gems, etc.—*Proc. Acad. Nat. Sci.*, 1876, 28.
- Lyon W., Kinsey E. L. Infra-red absorption spectra of water molecules in crystals.—*Phys. Rev.*, 1942, 61.
- Machatschki F. Mineralogische Notizen.—*Z. Kristallogr.*, 1926, 63.
- Machatschki F. Zur Frage der Struktur und Konstitution der Feldspate.—*Note. Zbl. Mineral., Abt. A.*, 1928.

- Madelung A. Beobachtungen mit Breithaupt's Polarisationsmikroskop.—Z. Kristallogr., 1883, 7.
- Mallard E. Über anomale optische Erscheinungen.—Z. Kristallogr., 1876, 1.
- Mallard E. Sur quelques phénomènes de polarisation chromatique.—Neues Jahrb. Mineral., 1882, 1.
- Mayer D. E. Gemmologist, 1955, 24, N 290.
- Mc Mahon C. A. Rock metamorphism.—Brit. Assoc. Advancem. Sci., 1902.
- Merritt Ern. On the absorption of certain crystals in the infrared as dependent on the direction of the plane of polarisation, 1895.
- Mukherjee B. Colour of beryl.—Nature, 1951, 167.
- Norrich K. An x-ray study of West Australian beryl.—J. Royal. Soc. West. Austral., 1950, 34.
- Palache C. The largest crystal.—Amer. Min., 1932, 17.
- Palache C. Minerals from Topas Mt., Vhan.—Amer. Min., 1934, 19.
- Paglianig, Martinenghi M. Il fibuc pegmatitico di Montescheno in Val Autrona (Ossola).—Periodico in. Roma, 1941, 12.
- Parsons A. L. Twinned beryl from Lyndoch Township, Reufrew County, Ontario.—Univ. Toronto Studies, Geol. Ser., 1932, № 32.
- Paulose C. The Odara pegmatite.—Econ. Geol., 1957, 52, № 6.
- Pehrman G. Zwei neue Zwillingengesetze bei Beryll.—Neues Jahrb. Mineral., Monatsh. 1953.
- Penfield S. L. On the occurrence of alkalies in beryl.—Amer. II. Sci., 1884, 28.
- Penfield S. L., Harper D. N. On the chemical composition of herderite and beryl, with note on the precipitation of aluminum and separation of beryllium and aluminum.—Amer. II. Sci., 1886, 32.
- Peyronell G. Investigation of the chemical constitution of bazzite from Bavenoby x-ray analysis.—Chem. Industria, 1954, 36.
- Pfaff F. Ueber eine eigentümliche Structur der Berylle und die angeblich optisch zwei-axigen Crystalle des quadratischen und hexagonalen Systems.—Ann. Phys. Chem., 1865, 124.
- Phemister T. Note on an occurrence of bertrandite and beryl at the South Crofty mine, Cornwall.—Min., Mag., 1940, 25, № 170.
- Pough F. H., Rogers T. H. Experiments in x-ray irradiation of gemstones.—Amer. Min., 1947, 32, № 1.
- Praagh G. van. Synthetic quartz crystals.—Geol. Mag., 1947, 84, № 2.
- Quensel P. Minerals of the Varutrask pegmatite. VII. Beryl.—Geol. fören. i Stockholm förhandl., 1937, 59, H. 3.
- Ramdohr P. Eine Fundstelle von Beryllium Mineralien im Gebiet der kleinen Spitzkoppe, Südwestafrika, und ihre Poragenesis.—Neues Jahrb. Mineral., Abt. A., 1940, 76.
- Royleigh L. Beryllium and helium. I. The helium contained in beryls of varied geological age.—Proc. Roy. Soc. London., Ser. A., 1933, 142.
- Royleigh L. Beryllium and helium.—Nature, 1933, 131.
- Read T. Baade and Zwicky's theory of cosmic rays and the helium content of beryls.—Nature, 1939, 144.
- Roebing W., Trommav H. W. Maxixeberyll. II. Analyse und Beiträge zur Trennung Beryllium-Aluminium und den Alkalien.—Zbl. Mineral., Abt. A., 1935.
- Rocks and Minerals, 1954, 29, № 5-6.
- Rodolico F., Spacagna O. Osservazioni statistiche sui cristalli di brillo dell'Isola d'Elba.—Atti (Mem) Soc. Toscana sci. natur., 1943, 51.
- Rolff P. A. Ambligonita na Paraíba.—Mineração e Metalurgia, Rio de Janeiro, 1944, 8.
- Rowledge H. P., Hayton I. G. Two new beryllium minerals from Londonderry.—J. Roy. Soc. West. Austral., 1948, 33.
- Rutland E. H. An unusual brown beryl.—Gemmologist, 1956, 25, № 304.
- Saito H., Kubota H., Kunimoto J. Chem. Soc. Japan. Industr. Chem. Soc., 1958, 61, № 5.
- Sasaki J. The determination of the helium content of some Japanese minerals.—Bull. Chem. Soc. Japan, 1926, 1.
- Schaller W. T., Fairchild T. Bavenite, a beryllium mineral, pseudomorphous after beryl, from California.—Amer. Min., 1932, 17, № 9.
- Schaller W. T., Stevens R. E., Jakus R. H. An unusual beryl from Arizona.—Amer. Min., 1962, 47, № 5 and 6.
- Schiebold E. Vergleichende Untersuchungen an natürlichen und synthetischen Smaragd-kristallen.—Z. Kristallogr., 1935, 92.
- Schlossmacher K., Klang H. Der Maxixeberyll. I.—Zbl. Mineral., Abt. A., 1935.
- Schmidt W., Baier E. Versuche über die Kinetik der Änderung optischer Eigenschaften mit der Temperatur.—Z. Kristallogr., 1928, 68.
- Schröder A. Türkiyede şayaur dikkat bazı mineraller.—Datensammuiung der Mineralien aus der türkischen Republik. Maden tetkik ve Arama Enstitüsü Mecmuası, 1941, 6.

- Scott H. S. The decrepitation method applied to minerals with fluid inclusions.—*Econ. Geol.*, 1948, **43**.
- Slager A. F. The surface structure of crystals.—*Min., Mag.*, 1953, **30**, № 220.
- Seaman D. M. Some recent finds in Maine and New Hampshire.—*Rocks and Minerals*, 1949, **24**.
- Simpson E. Minerals of Western Australia, v. 1, Perth. West. Australia, 1948.
- Spencer L. J. A crystal of aquamarine.—*Natur.—History Mag. Brit. Mus.*, 1927, **1**.
- Sorby H. C., Butler P. T. On the structure of rubies, sapphires, diamonds and some other minerals.—*Proc. Roy. Soc. London*, 1869, **17**.
- Staněk I. Spodumen a bavenite z Ieclova.—*Časop. Moravského mus. Brně, Vědy přírod.*, 1954, **39**.
- Strand T. Euclase from Iveland, occurring as an alteration product of beryl.—*Norsk. geol. tidsskr.* 1953, **31**.
- Traube H. Ueber die künstliche Darstellung des Berylls.—*Neues Jahrb. Mineral.*, 1894.
- Van Valkenburg A., Weir C. E. Beryl studies BeO, Al₂O₃, 6SiO₂.—*Bull. Geol. Soc. America*, 1957, **68**.
- Vernadsky W. Tr. Musée géol. Pierre Legrand, St. Petersburg, 11.—*Neues jahrb. Minéral.*, 1909.
- Villalba A. M. B. Estructura de las esmeraldas de Muzo.—*Rev. Acad. Colombiana*, 1953, **9**.
- Walke H. I. The helium content of beryls.—*Phys. Rev.*, 1935, **47**.
- Walten T. Unusual emerald.—*Gemmologist*, 1950, **19**.
- Washington H. S. Beryllium in minerals and igneous rocks.—*Amer. Min.*, 1931, **16**.
- Webster R. The emerald.—*J. Gemmology*, 1955, **5**.
- Wlis P. L. Fluid inclusions in minerals from zoned pegmatites of the Black Hills, South Dakota.—*Amer. Min.*, 1953, **38**.
- Wickersheim K. A., Buchanan R. A. The near infrared spectrum of beryl.—*Amer. Min.*, 1959, **44**.
- Wilke K. Th. Die Entwicklung der Kristallzüchtung seit 1945.—*Fortschr. Mineral.*, 1956, **34**, H. 2.
- Wilk F. J. Mineralogiska och petrografiska meddelanden.—*Finska Vet. Soc. Förhandlingar*. XXVII, 1885, № 44-45.
- Wyart I., Ščavinčar S. Synthèse hydrothermale du beryl.—*Bull. Soc. franç. mineral., cristallogr.*, 1957, **80**.
- Zambonini, Caglioti. Ricerche chimiche sulla roosterite di San Piero in Campo (Isola d'Elba) e sui berilli in generale.—*Gazz. chim. ital.*, 1928, **58**.

ТАБЛИЦЫ

Объяснения к таблицам

Таблица I

a — игольчатые кристаллы бесщелочного берилла из пегматита; *b* — длиннопризматические кристаллы бесщелочного берилла из грейзена; *в* — призматический кристалл натриевого берилла из альбитизированного пегматита

Таблица II

a — короткопризматический кристалл берилла из пегматита; *b* — пластинки прозрачных ростеритов, нарощие на микроклин, из пегматита; *в* — пластинки розового ростерита с альбитом из пегматита; *г* — форма берилла с аномально пониженной (ромбической) симметрией; *д* — сросток кристаллов изумруда из Мюзоз; *е* — сросток кристаллов гелиодора

Таблица III

a — сросток $\parallel C$ аквамаринов из грейзенов; *b* — сросток бесцветных бериллов из измененных змеевиков; *в* — тот же сросток, что и в пункте *b*, но сфотографированный со стороны грани 0001

Таблица IV

a — сростки $\parallel C$ натриевых бериллов из альбитизированных пегматитов; *b* — столбчатые кристаллы литиевого розового берилла в срastании; *в* — типичный сросток $\parallel C$ кристаллов изумруда; *г* — параллельное срastание изумрудов; *д* — параллельно срastшиеся кристаллы изумруда в трещине

Таблица V

a — лучистый сросток изумрудов; *b* — сноп метасоматических кристаллов изумруда в тальке

Таблица VI

a — неориентированный сросток кристаллов натриевого берилла; *b* — неориентированный сросток кристаллов бесщелочного берилла; *в* — сростки аквамаринов и морионов из занорышей в незамещенных пегматитах; *г* — сросток гелиодора и альбита в пегматите; *д* — сросток мусковита и берилла из гидротермальных жил в измененных змеевиках

Таблица VII

a — срastания прозрачных ростеритов и альбита в полостях перекристаллизации в пегматитах; *b* — отпечатки на натриевом берилле из пегматита; *в* — индукционный рельеф отпечатков на берилле; *г* — рельеф метасоматического роста изумруда в тальке

Таблица VIII

a — порфириобласт щелочного берилла неправильной формы в альбит-слюдистом агрегате в замещенном пегматите; *b* — форма угнетенного роста воробьевита; *в* — ступенчатость метасоматического роста кристалла берилла; *г* — угнетение с образованием

слоистости и ступенчатости на гранях и ребрах кристаллов берилла; *д* — конусовидный кристалл берилла в микроклине и альбите; *е* — конусовидные натриевые бериллы из альбитизированных пегматитов

Таблица IX

а — конусовидный берилл из пегматита; *б* — желобчатый кристалл натриевого берилла; *в*, *г* — переходная форма от корытовидного кристалла берилла к фаршированному в породе

Таблица X

а, *б* — фаршированные кристаллы берилла с турмалином, кварцем, полевым шпатом, мусковитом, гранатом; *в* — ориентированное расположение по отношению к фаршируемому бериллу кристаллов метасоматического турмалина среди кварца и полевого шпата; *г* — ориентированные сростания с кристаллами турмалина в фаршированном берилле

Таблица XI

а — ориентированное расположение кристаллов берилла внутри фарша из кварца, мусковита, альбита, граната в большом фаршированном кристалле берилла; *б* — рельеф скелетного роста; *в*, *г* — крупные субиндивиды и блоки, возникшие при скелетном росте ростерита в занорыше среди слюдисто-глинистого вещества

Таблица XII

а — скелетный кристалл берилла среди гидрослюд; *б* — скелетный кристалл метасоматического изумруда из тальковой породы; *в*, *г* — кристаллы берилла с угнетенной формой псевдопирамиды; *д* — раздробленный кристалл берилла, сцементированный кварцем

Таблица XIII

а — раздробленный кристалл изумруда, сцементированный флогопитом; *б* — цементация и разедание альбитом кристалла берилла; *в* — искривление и образование трещин разрыва в конусовидном кристалле берилла из пегматита

Таблица XIV

а — шестиугольные фигуры роста на грани $(10\bar{1}0)$; *б* — ромбовидные фигуры роста на грани $(10\bar{1}0)$; *в* — шестиугольные удлиненные фигуры роста на грани $(10\bar{1}0)$; *г* — ромбовидные фигуры роста на грани $(11\bar{2}1)$; *д*, *е* — шестиугольные фигуры роста на грани (0001)

Таблица XV

а — образование слоя на грани $(10\bar{1}0)$ путем слияния шестиугольных фигур роста; *б* — образование слоя на грани (0001) , слившегося из шестиугольных фигур роста; *в* — послонный рост на грани $(10\bar{1}0)$; *г* — на грани (0001) ; *д* — узкие штрихи-выступы, параллельные оси *с*

Таблица XVI

а — слоисто-ступенчатое построение штриха-выступа (поглотительный контраст); *б* — цепочковидное расположение фигур роста в прерывистом штрихе-выступе на грани $(10\bar{1}0)$; *в* — штрихи-выступы, образованные из фигур роста квадратной формы на грани $(10\bar{1}0)$; *г*, *д* — штрихи-выступы, образованные слиянием шестиугольных фигур роста, параллельно оси *с*

Таблица XVII

а, *б* — перекрывание штрихов-выступов одного направления штрихами-выступами другого направления; *в* — отклонение на несколько градусов узких прямолинейных

штрихов-выступов от общего направления штриховки на грани $(10\bar{1}0)$; z — отклонение штрихов-выступов от основного направления штриховки на грани $(10\bar{1}0)$ (снято с помощью поглотительного контраста); d, e — криволинейные штрихи-выступы на грани $(10\bar{1}0)$

Т а б л и ц а XVIII

a, b — отклонение штрихов-выступов и выклинивание около каналов, параллельных (0001)

Т а б л и ц а XIX

a, b — переход от разрастания фигур роста в виде штрихов-выступов к разрастанию в виде плоского слоя на грани $(10\bar{1}0)$ (снято с поглотительным контрастом); v — перекрывание рельефа, образованного штрихами-выступами, сплошным слоем на грани $(10\bar{1}0)$; z — сложный рельеф, образованный многообразием разрастания фигур роста шестиугольной и ромбовидной формы на грани $(10\bar{1}0)$; d, e — рельеф дендритного разрастания штрихов-выступов на грани $(10\bar{1}0)$.

Т а б л и ц а XX

a — соединение штрихов-выступов одной высоты в сплошной плоский слой на грани $(10\bar{1}0)$; b — пупырчатость на грани $(10\bar{1}0)$, образованная удлинено-овальными вициналями; v, z — формы, переходные от ромбовидных фигур роста на грани $(10\bar{1}0)$ к овальным вициналям

Т а б л и ц а XXI

a — сложно построенная вицираль гексагональной формы на грани (0001) ; b — ступенчатое строение криволинейных граней — переходной формы от фигуры роста на грани (0001) к вицинали; v — ступенчатое строение гексагональной вициальной пирамиды на грани (0001) , имеющей неправильную форму в основании; z, d — асимметрично построенные вицинали и их ступенчатая природа; e — штрихи-выступы, построенные вициналями на грани $(10\bar{1}0)$

Т а б л и ц а XXII

a — неправильные границы между гексагональными вициналями на грани (0001) (в косом свете); b — то же (при расфокусировке); v — смещение и искривление торцов слоев вдоль дислокационной линии; z — спирали на грани $(10\bar{1}0)$ кристалла берилла; d — двухступенчатая спираль ромбовидной формы на грани $(10\bar{1}0)$

Т а б л и ц а XXIII

a — спиральный и чешуйчатый рельеф на грани $(10\bar{1}0)$; b — эллипсовидные спирально построенные вицинали на грани $(10\bar{1}0)$; v — ломанно-концентричные спиральные слои на грани (0001) ; z — взаимодействие нескольких спиралей на грани (0001) ; d — переплетенные спирали, исходящие из одного центра (фазовый контраст); e — спиральное разрастание многих слоев из области дислокации

Т а б л и ц а XXIV

a — вициальное образование в виде бритвенного лезвия; b — выходы выступов на грани $(10\bar{1}0)$ монокристалла берилла, погруженного в слюдястый агрегат; v — гребенчатые выступы, осложняющие края штриха-выступа на грани $(10\bar{1}0)$; z — многоступенчатая поверхность метасоматического роста на грани $(10\bar{1}0)$; d — бугристая поверхность на грани (0001)

Т а б л и ц а XXV

a — многоступенчатая поверхность на грани $(10\bar{1}0)$; b — грубошестиугольный выступ на вершине метасоматического кристалла; v — одинаковая ориентировка выступов-бугров на грани $(10\bar{1}0)$ метасоматического берилла; z — расчлененный рельеф на грани

(1010) метасоматического кристалла берилла, образованный шестиугольными и ромбовидными выступами; *d* — ступенчатое выклинивание штрихов-выступов на грани (1010), *e* — зубчатые края односторонних ступеней-штрихов на грани (1010).

Таблица XXVI

a — неориентированные вроски мусковита в поверхность кристалла берилла; *b* — отпечатки неизвестного минерала (карбонаты?) правильной формы на кристалле изумруда из битуминозных известняков; *v* — вроски слюды на поверхности (0001); *z* — индукционная штриховка на грани (1010) берилла

Таблица XXVII

a — микрорельеф отпечатков вершин кристаллов берилла на грани (1010) кристалла берилла; *b* — индукционная штриховка с элементами метасоматического роста на грани (1010) кристалла берилла

Таблица XXVIII

a — поперечная цветовая зональность в длиннопризматическом кристалле берилла; *b* — зональные кристаллы берилла — изумруда; *v* — голубая поперечная зона в кристалле берилла; *z* — поперечная зональность по величине светопреломления; *d* — концентрическая зональность

Таблица XXIX

a — натяжения в структуре берилла, приводящие к оптическим аномалиям; *b* — концентрически зональное распределение оптических аномалий в изотропном сечении берилла; *v* — пятнистое распределение оптических аномалий в изотропном сечении берилла; *z*, *d* — твердые частицы на концах канальчатых первичных газовой-жидких включений

Таблица XXX

a — первичное многофазное включение овальной формы; *b*, *v* — канальчатые включения в виде отрицательных кристаллов; *z* — крупное многофазное первичное включение с менее выраженной перекристаллизацией стенок, чем мелкие первичные включения

Таблица XXXI

a, *b* — первичные включения (с постоянным соотношением фаз) неправильной формы; *v* — закрытая трещина разрыва в берилле, заполненная вакуумом; *z* — перешнуровка включений при залечивании трещин; *d* — образование крупных мнимовторичных включений при залечивании трещин, пересекающих первичные включения

Таблица XXXII

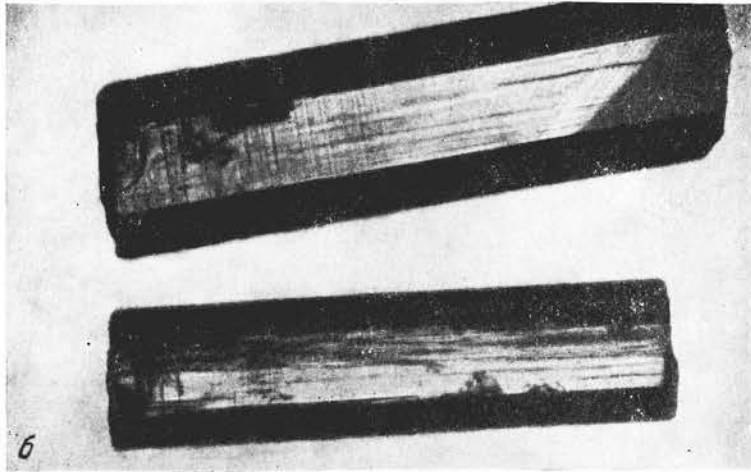
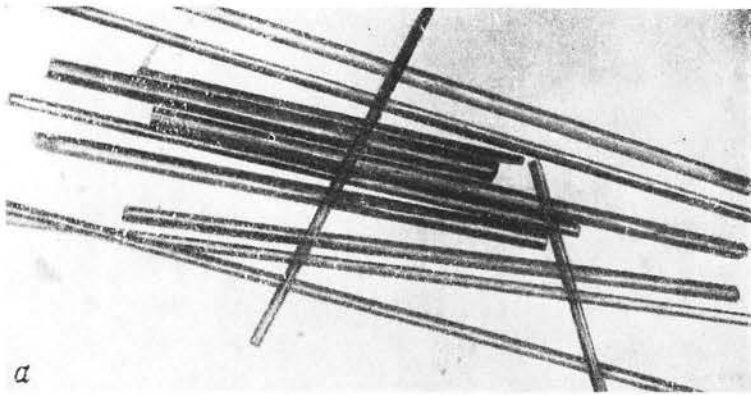
a — мнимовторичные включения в залеченной трещине, параллельной спайности в плоскости (0001); *b* — вертикальная штриховка на гранях первичного канальчатого включения; *v* — скульптура послонного роста на грани (1010) жидкого включения; *z* — треугольные скульптуры роста на грани (0001) жидкого включения; *d* — трехфазные включения в виде отрицательного кристалла

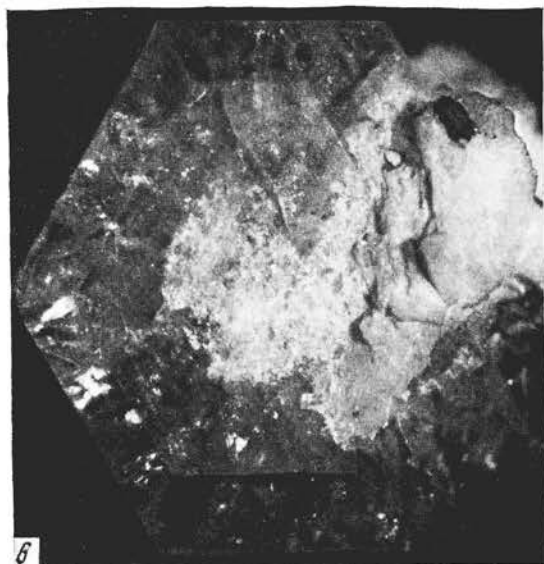
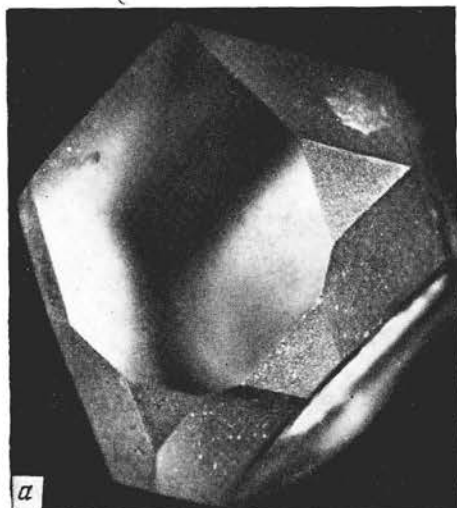
Таблица XXXIII

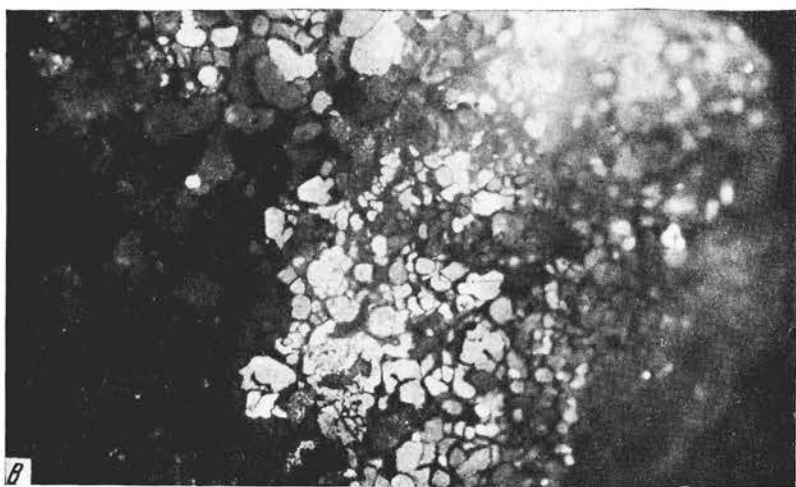
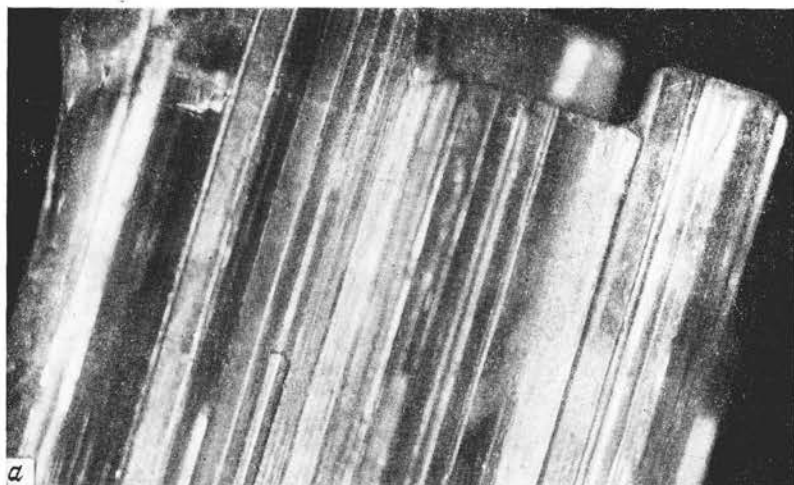
a — канальчатое включение, образовавшееся вслед за отталкиваемыми твердыми частицами, позднее законсервированными кристаллом; *b* — скульптуры роста на грани (0001) вторичного включения

Таблица XXXIV

a — частично метаморфизованные включения с водным раствором, жидкой и газообразной углекислотой; *b* — то же самое, на стенках видны скульптуры роста; *v* — включение с водным раствором, газовым пузырьком, мусковитом, сильвинном и кварцем; *z* — включение с водным раствором и изотропной солью; *d* — включение с водным раствором, жидкой и газообразной углекислотой, кварцем, мусковитом, фенакитом (?); *e* — включение с водным раствором, биотитом и аморфным веществом.





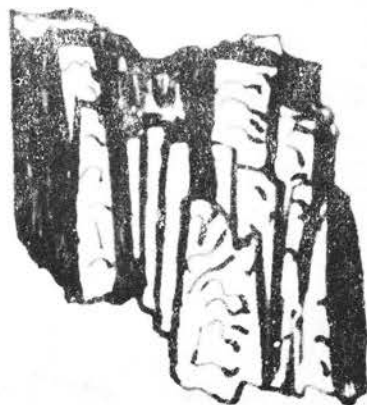




a



б



в

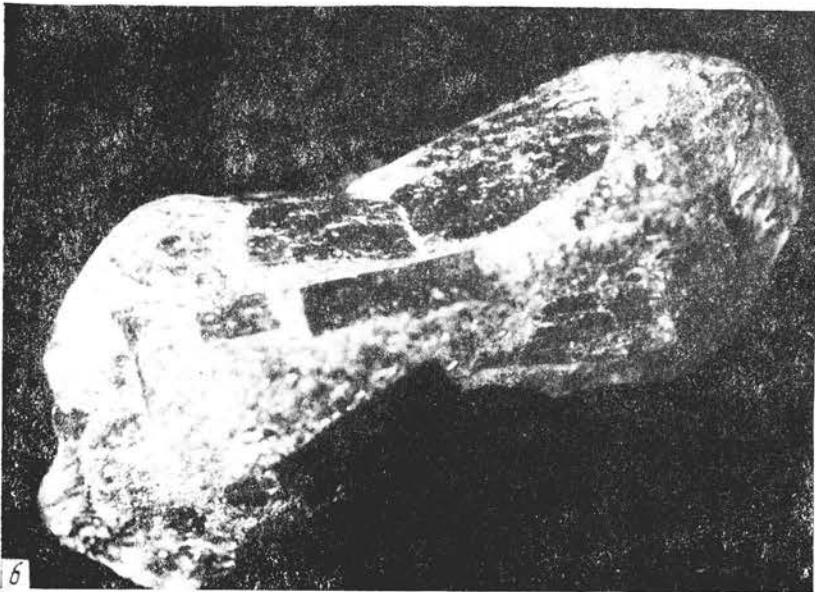
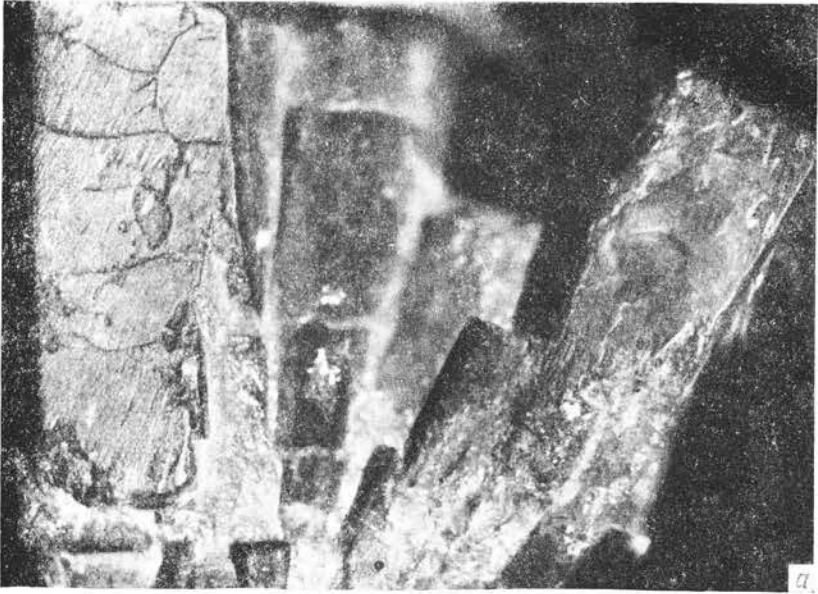


г



д

Таблица V



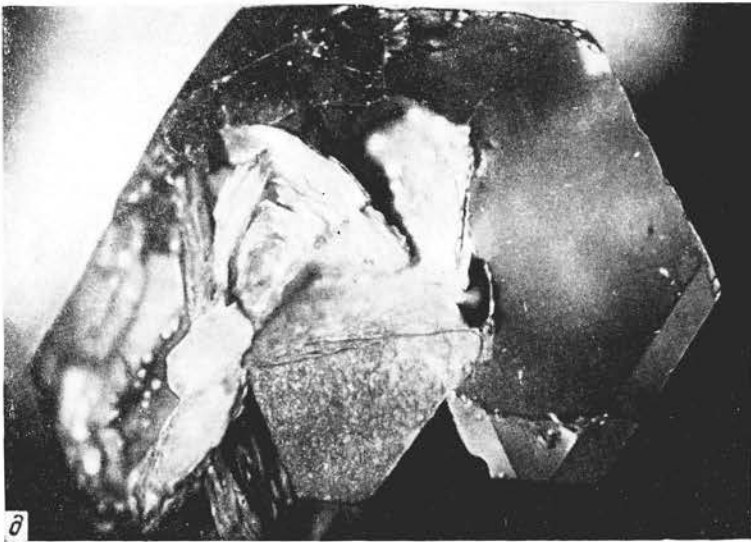
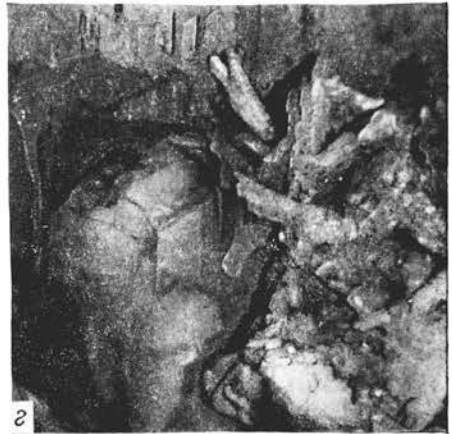
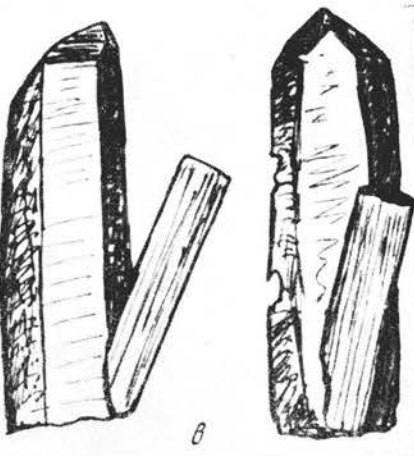
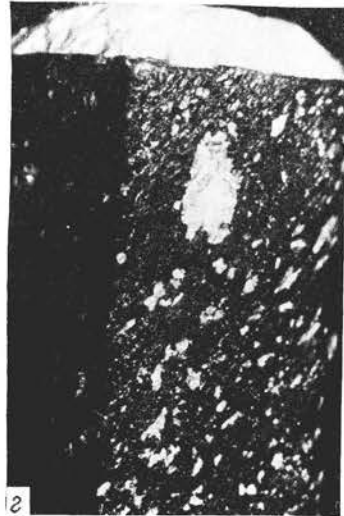
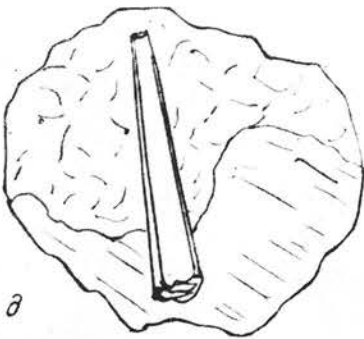
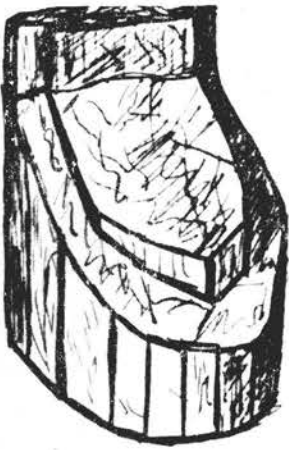
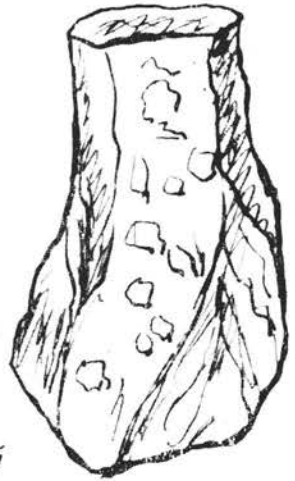
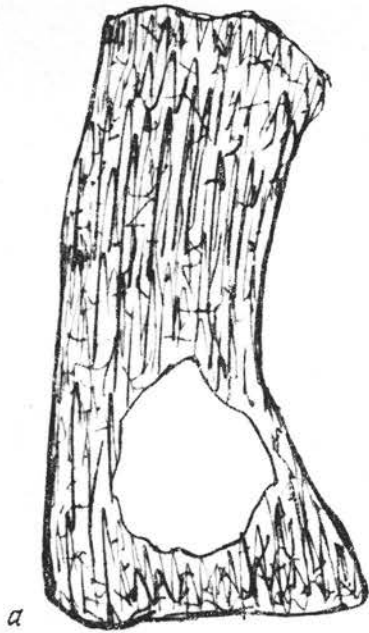
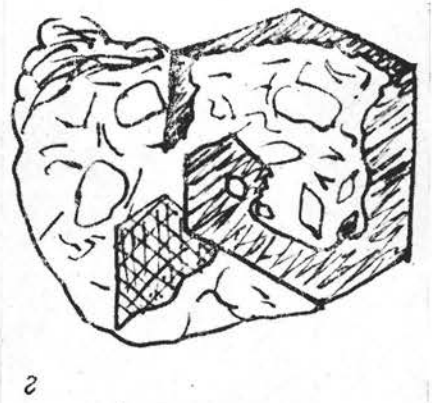
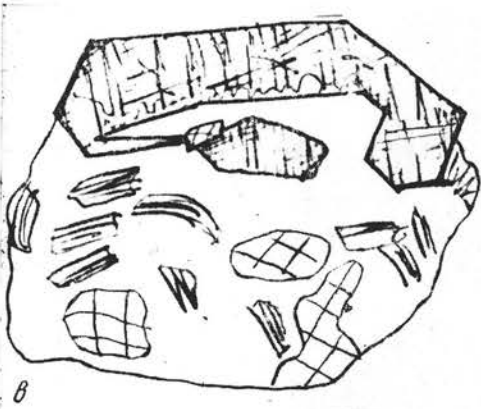
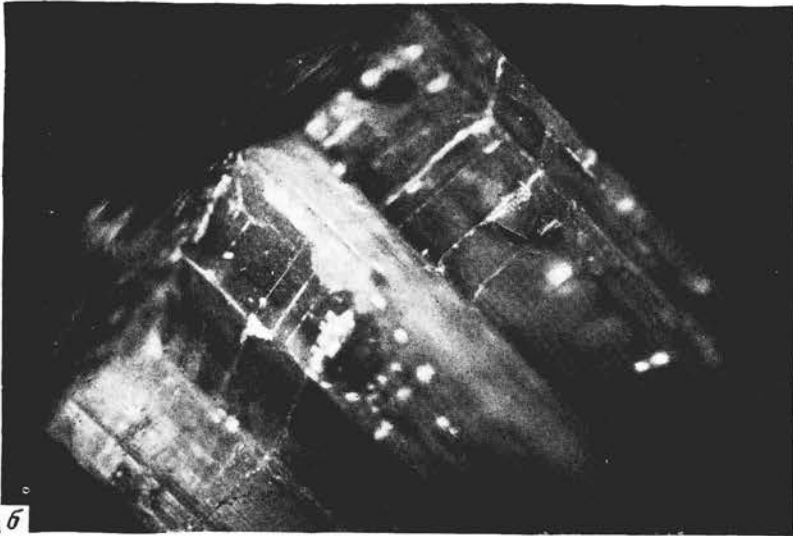
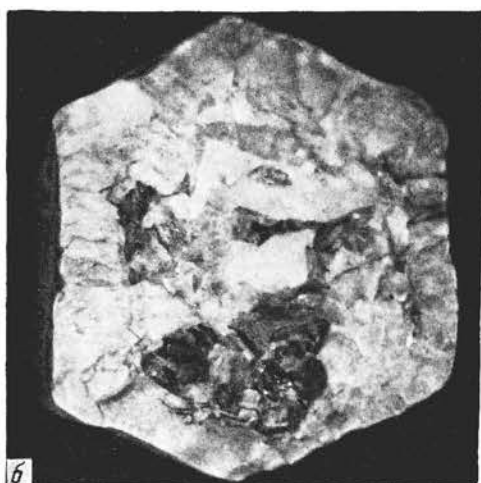
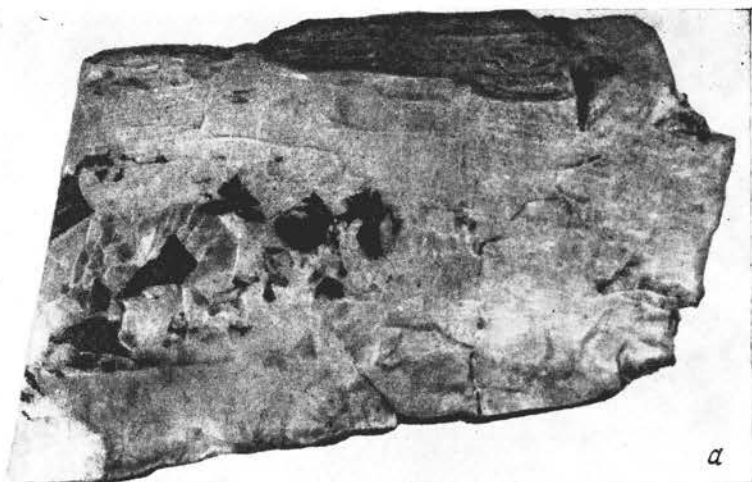


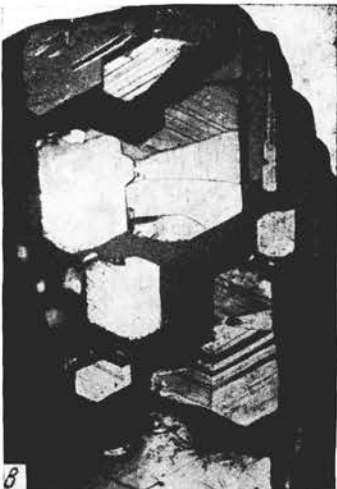
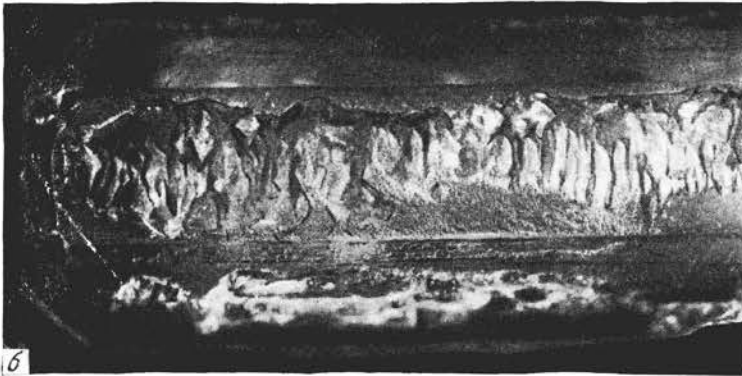
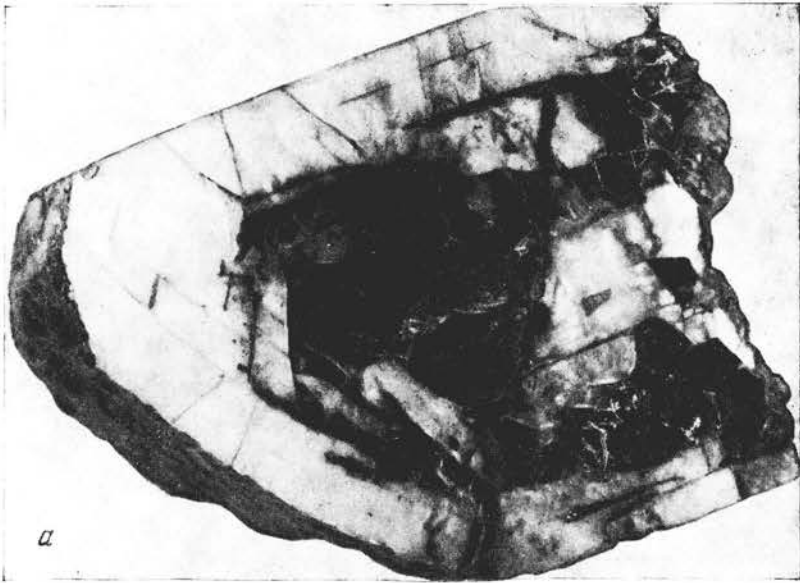
Таблица VII











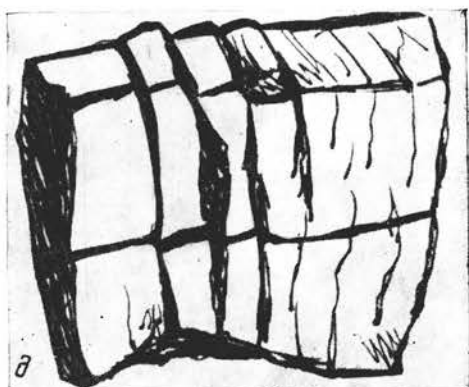
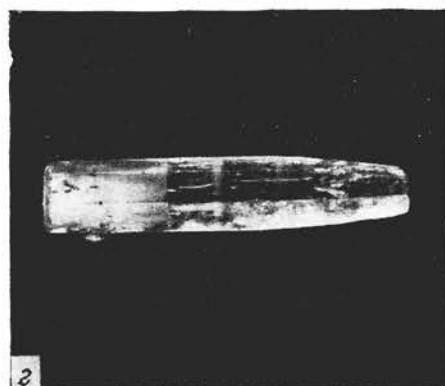
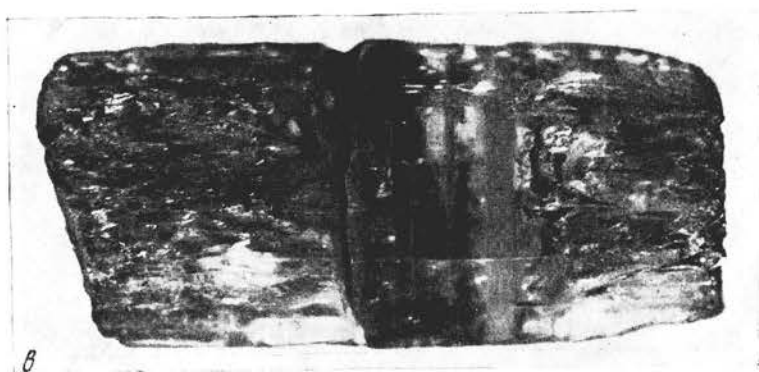




Таблица XIV

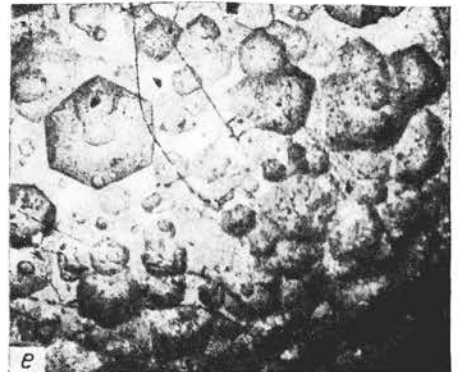
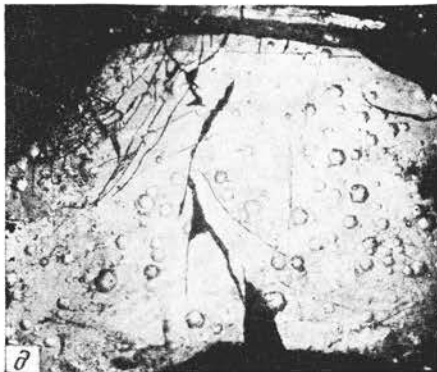
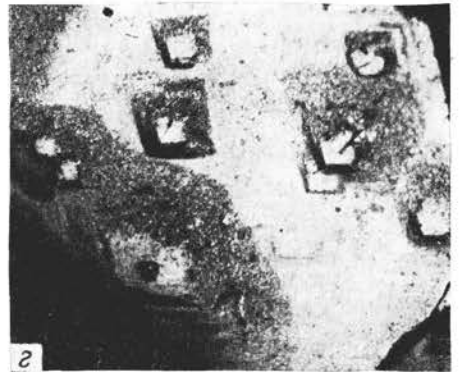
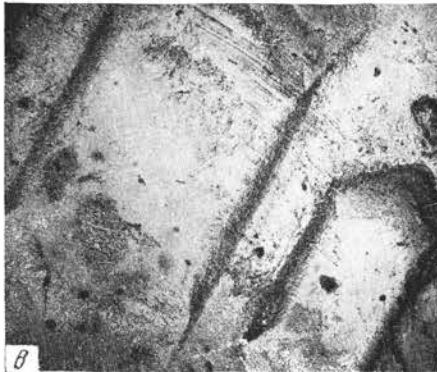
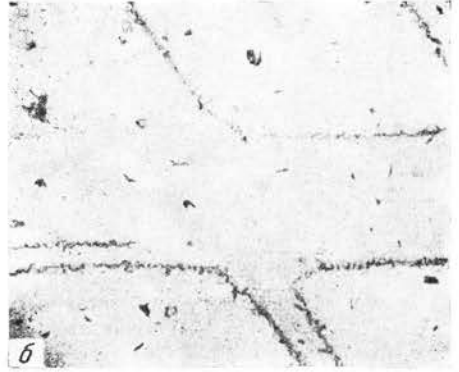
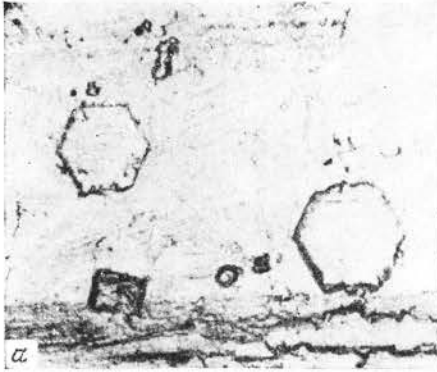
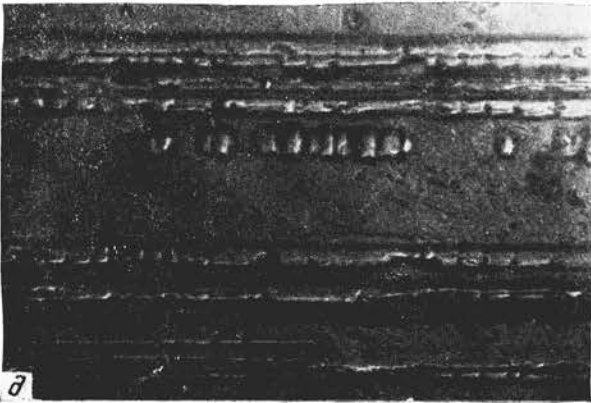
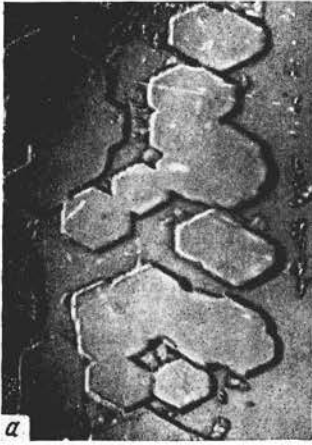


Таблица XV



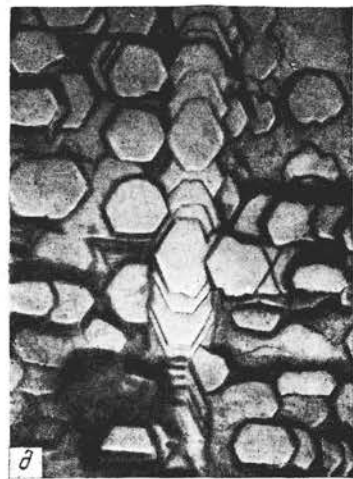
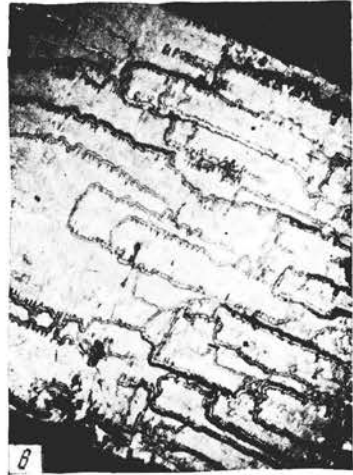
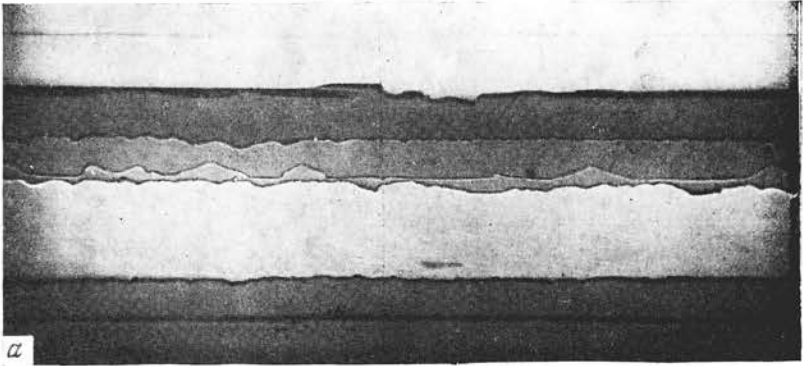


Таблица XVII

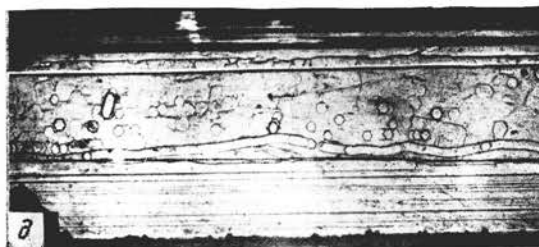
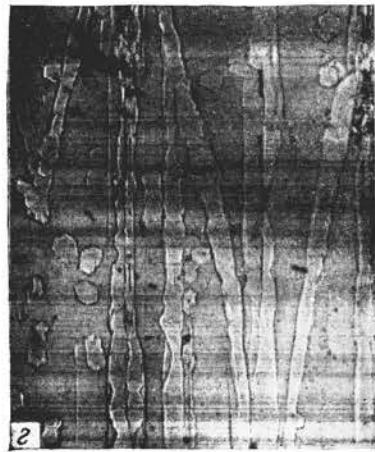
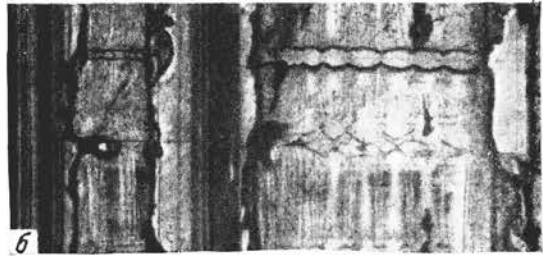
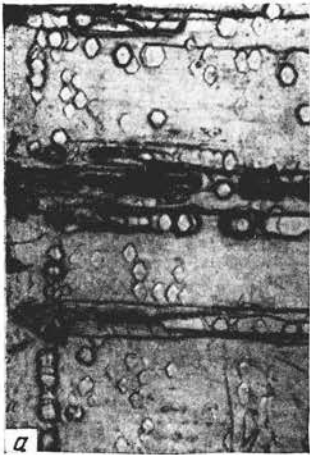
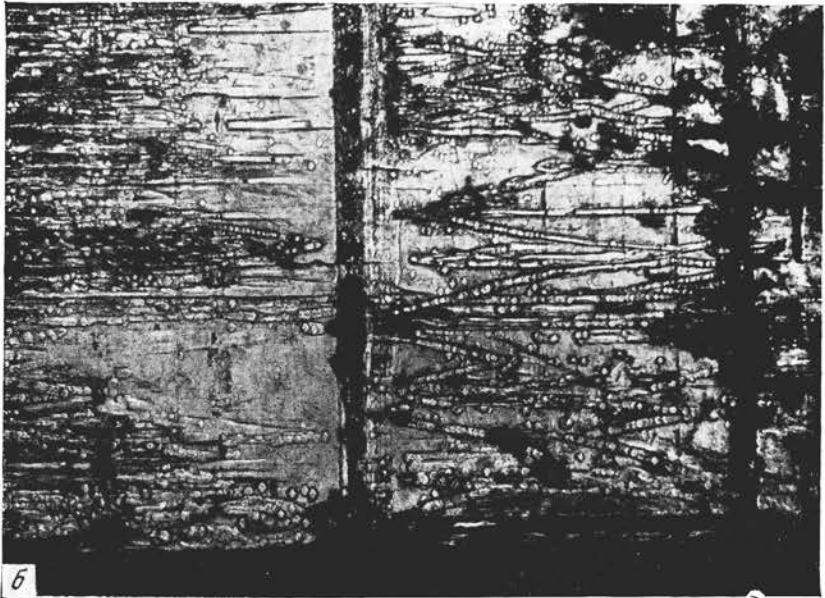
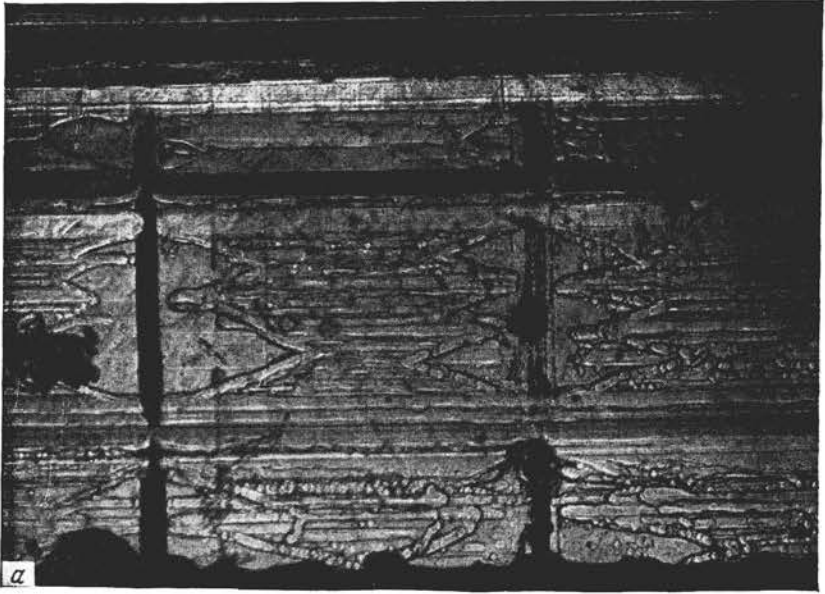
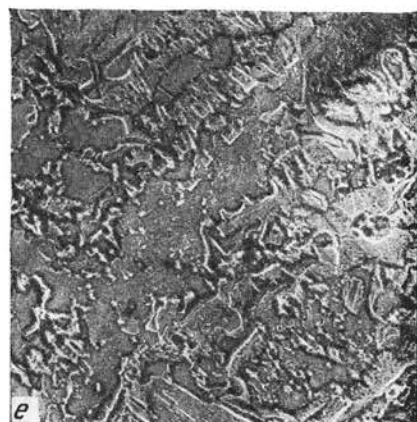
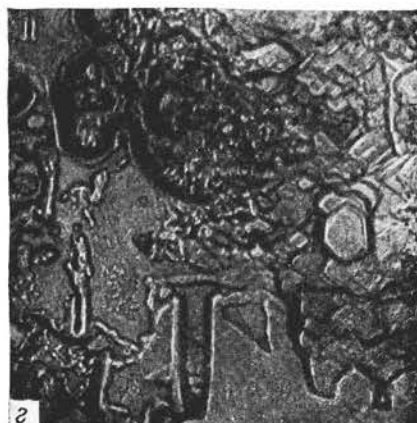
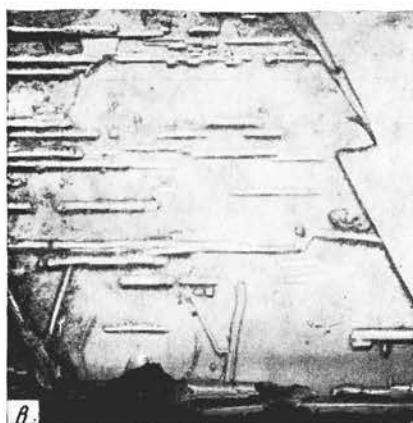
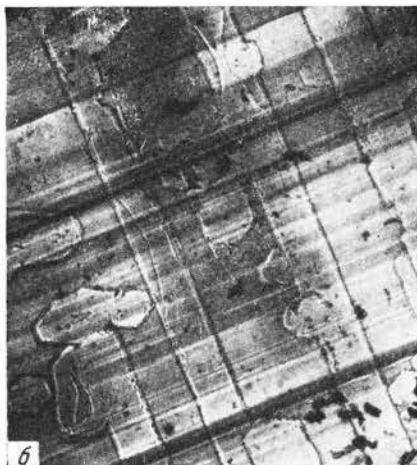
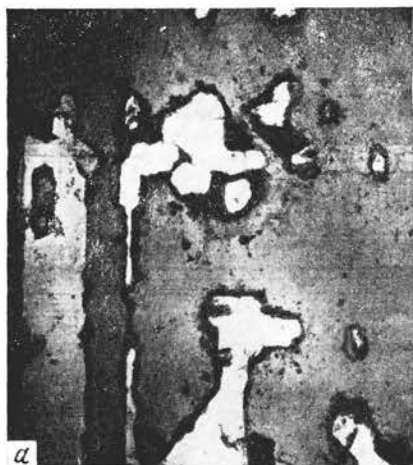
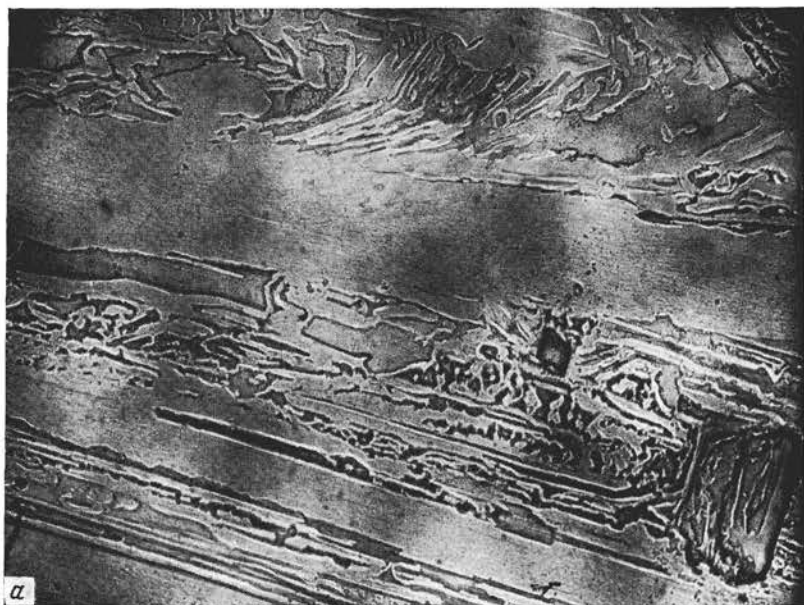


Таблица XVIII







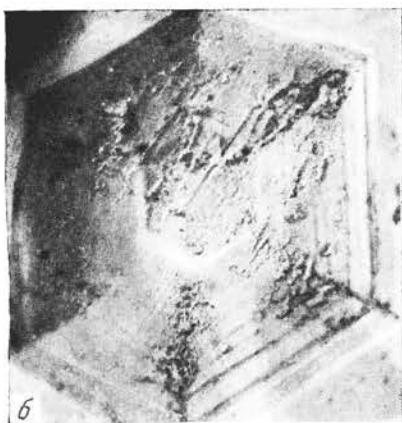
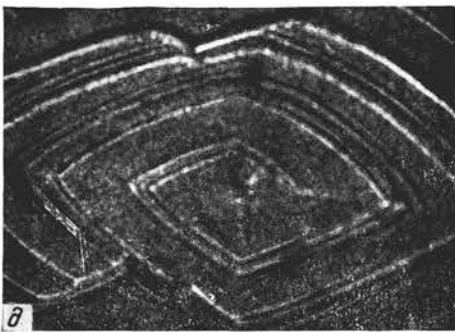
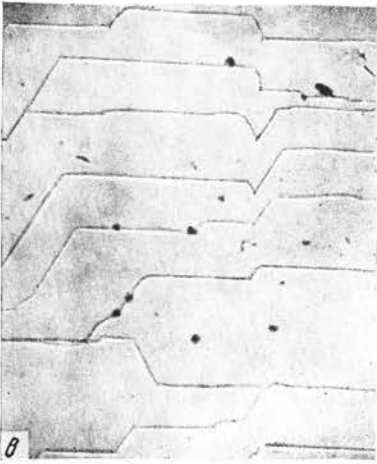
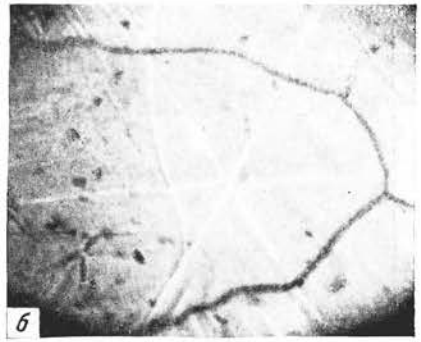
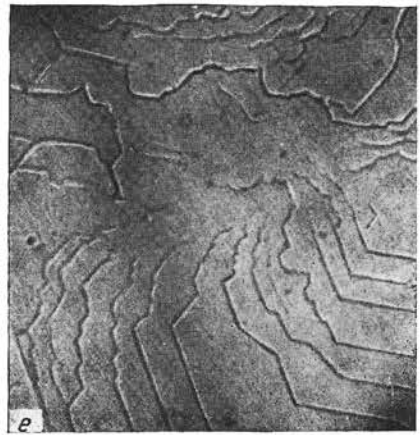
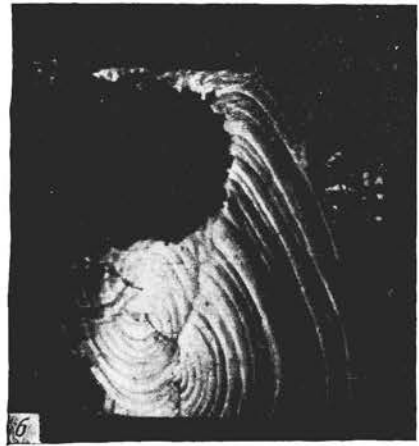
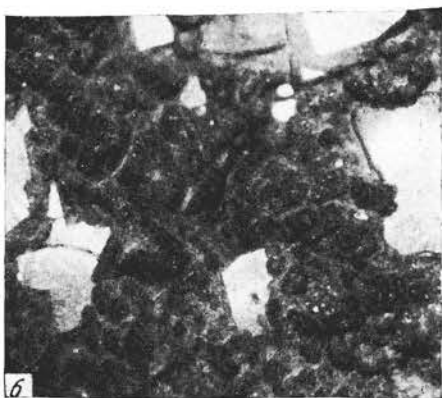
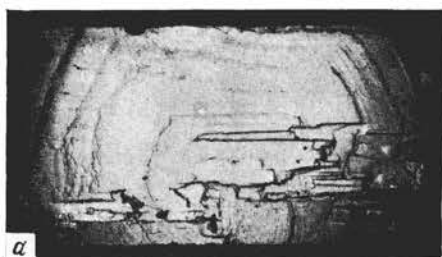
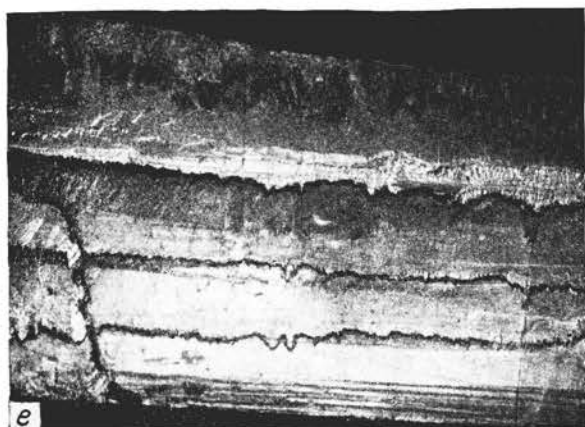
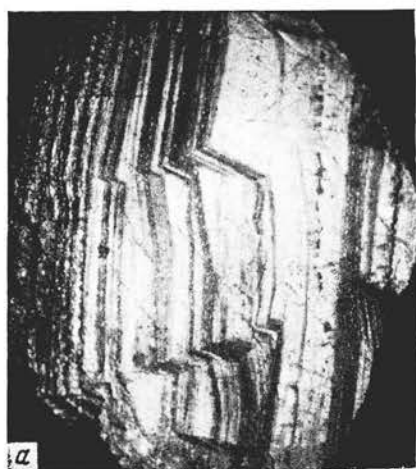


Таблица XXII









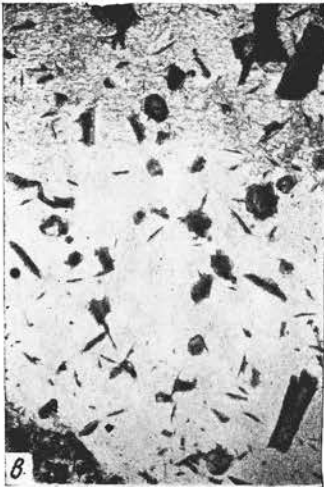
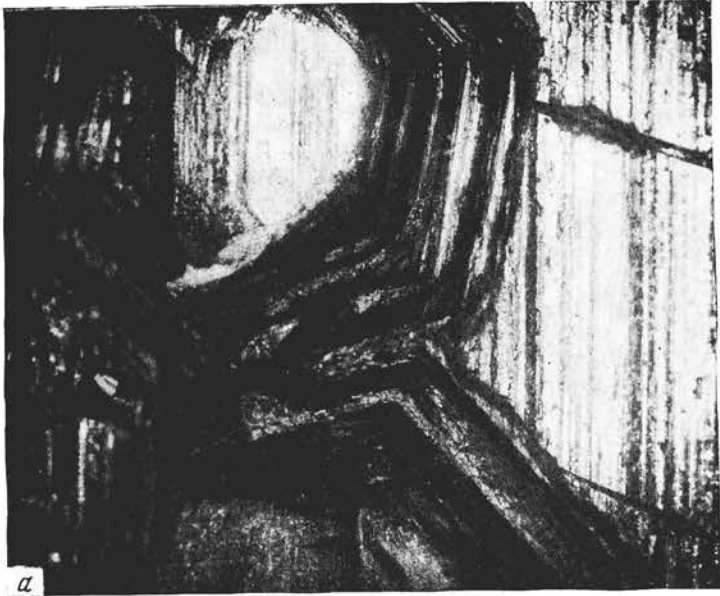
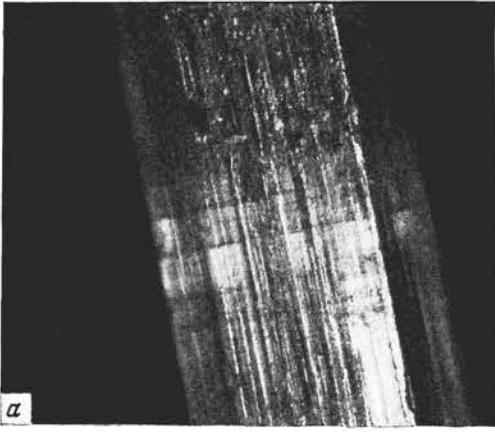


Таблица XXVII

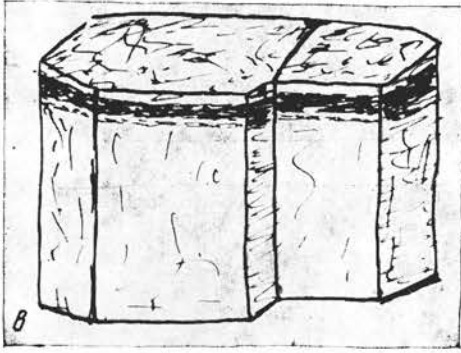




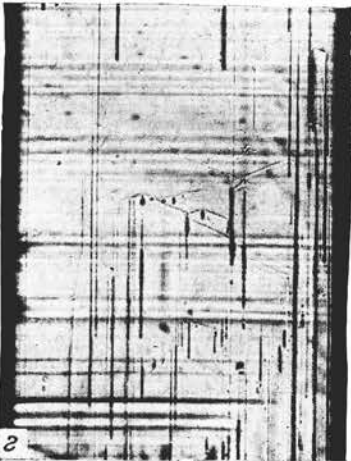
а



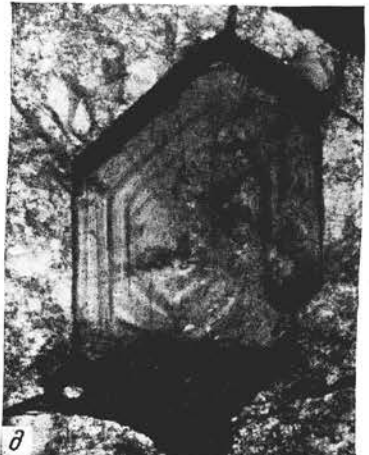
б



в

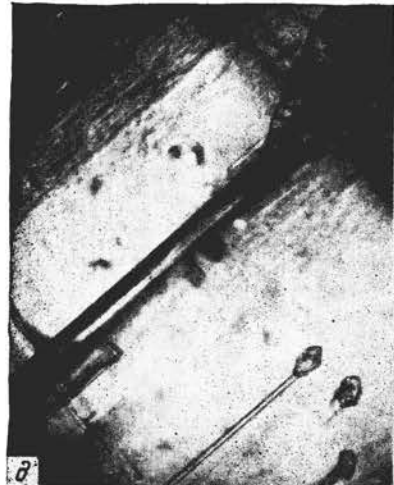
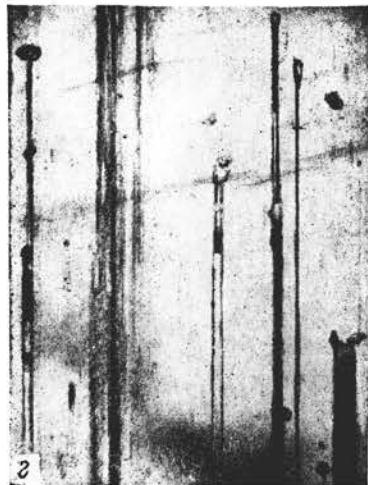
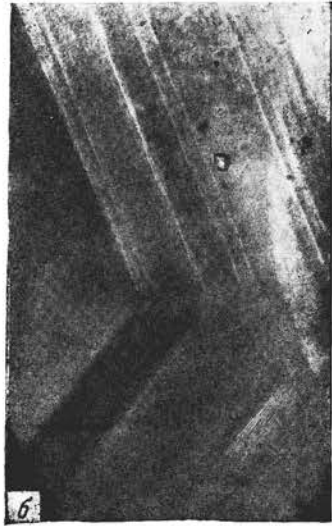


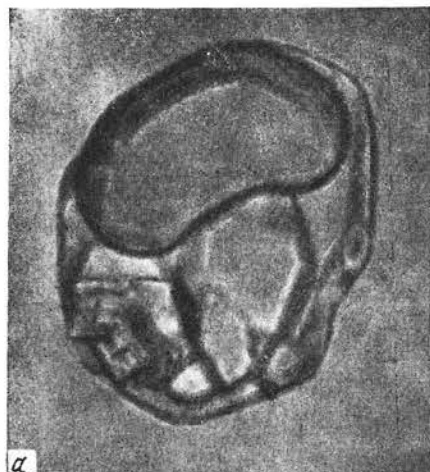
г



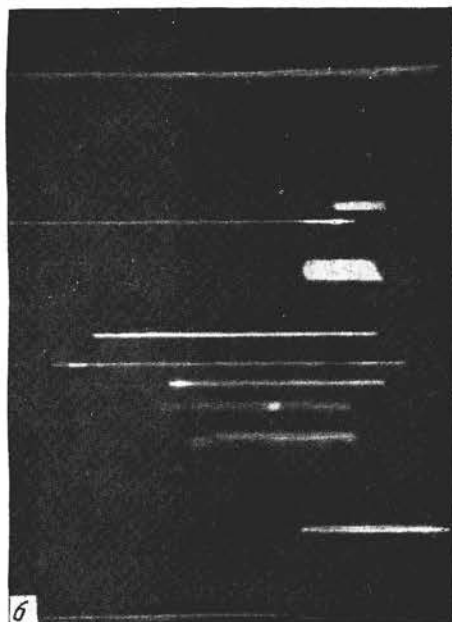
д

Таблица XXIX

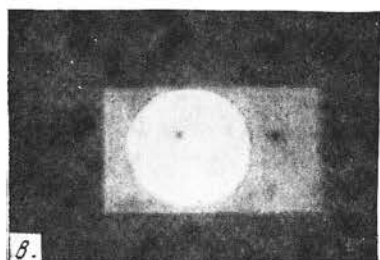




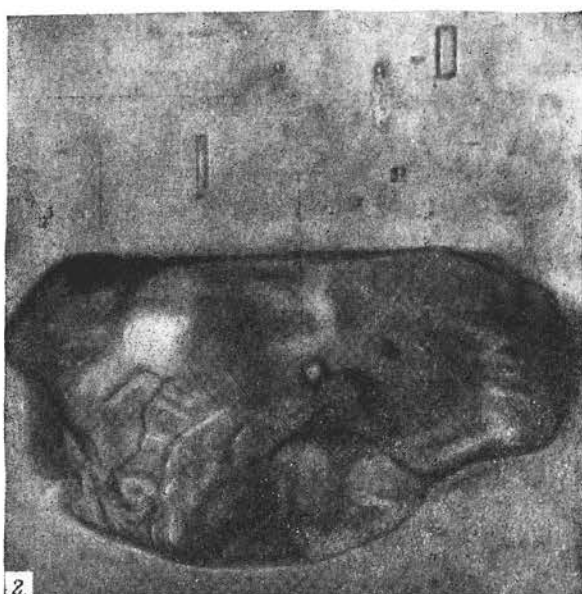
а



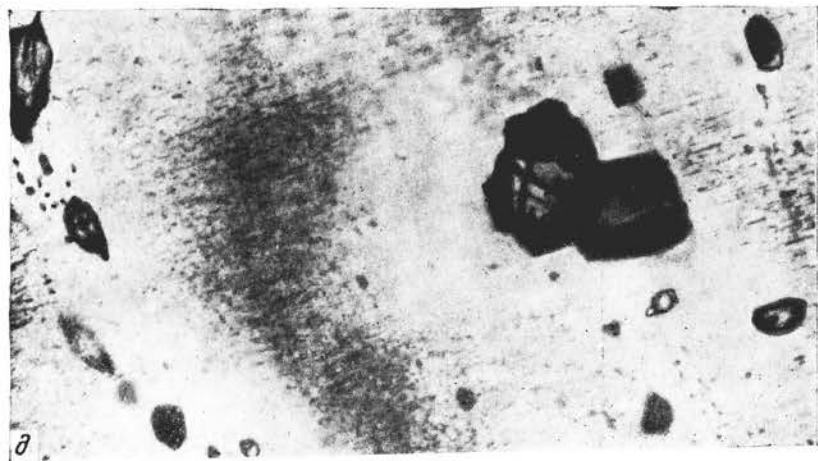
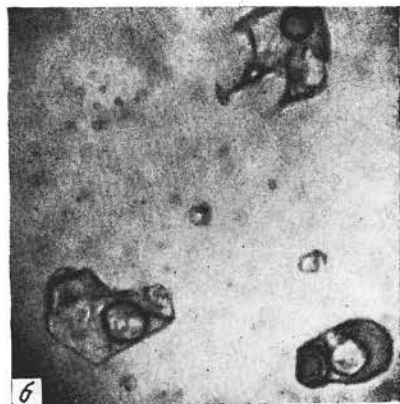
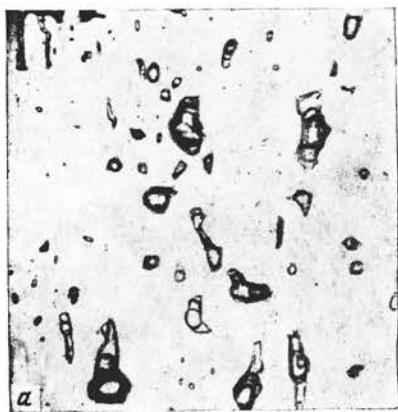
б

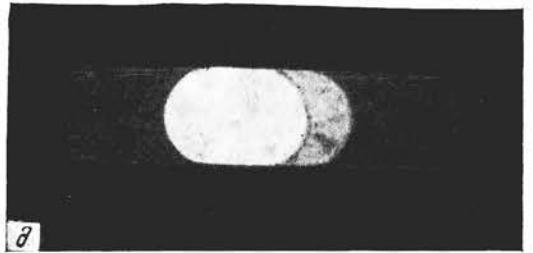
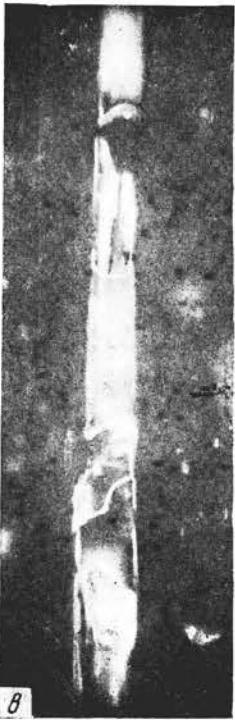
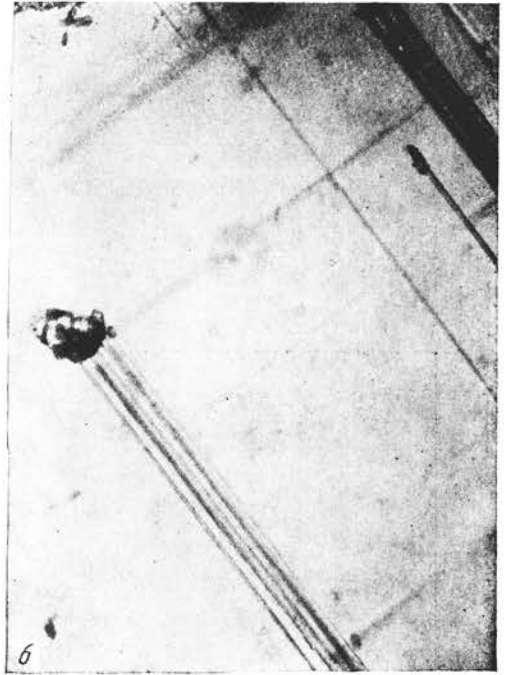
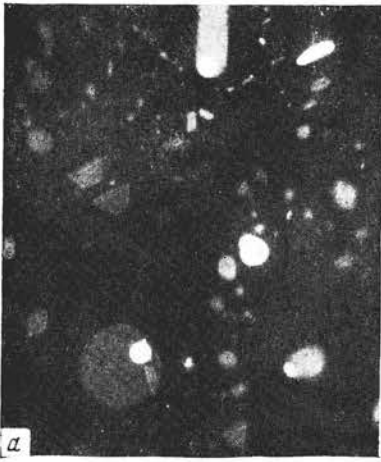


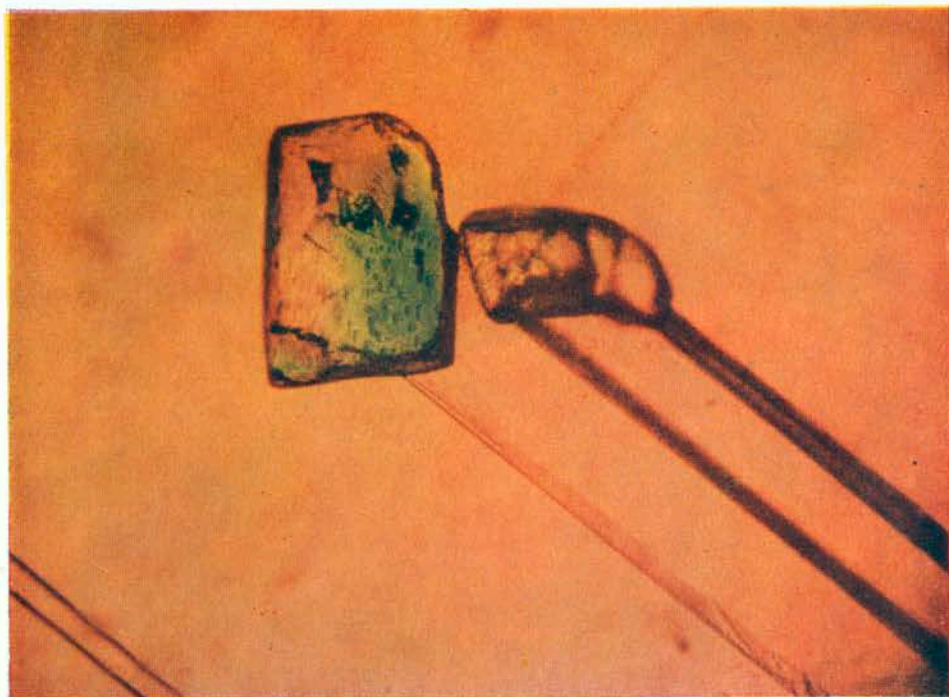
в



г





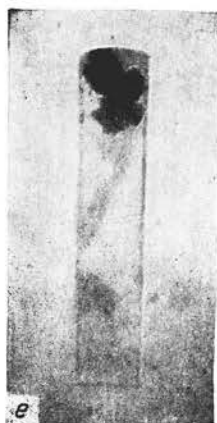
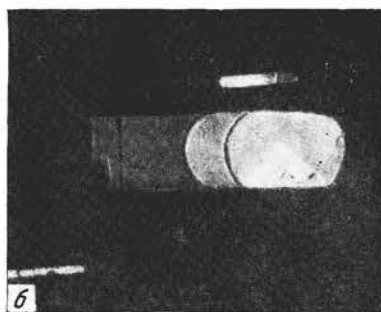
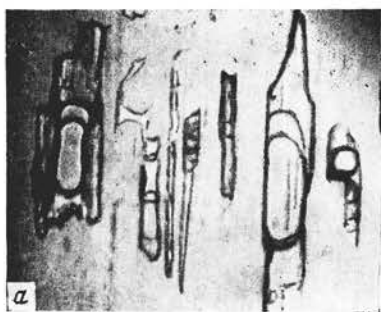


а



б

Таблица XXXIII



Оглавление

Введение	3
<i>Глава 1.</i> Общие сведения о берилле	5
Минералогия берилла	5
Месторождения и парагенезис берилла	8
Классификация берилла и его разновидности	8
Естественные типы берилла	12
<i>Глава 2.</i> Кристаллохимическое строение берилла	13
Структура берилла и ее изменение в зависимости от химического состава	13
Химический состав и кристаллохимия берилла	17
Содержание и положение щелочей, щелочных земель, железа и воды в берилле в зависимости от генетических и кристаллохимических факторов	25
Главные ряды изоморфизма в берилле	34
Зависимость параметров элементарной ячейки берилла от химического состава	34
<i>Глава 3.</i> Оптическое строение берилла	36
Светопреломление берилла	36
Окраска берилла	50
<i>Глава 4.</i> Кристалломорфологическое строение берилла	59
Макроморфология роста кристаллов берилла	59
Микроморфология роста кристаллов берилла	68
<i>Глава 5.</i> Неоднородности и изменения во внутреннем строении берилла	82
Оптические аномалии и оптические неоднородности в зональных кристаллах берилла	82
Изменение внутреннего строения берилла при энергетических и химических воздействиях	86
Газово-жидкие и твердые включения в кристаллах берилла	90
<i>Глава 6.</i> Общие закономерности связи свойств, строения, состава и условий образования берилла	99
Единство зависимостей физических свойств и строения берилла от химического состава	99
Берилл как геохимический индикатор	100
Типоморфизм берилла	101
Отличительные признаки бериллов, кристаллизовавшихся разным способом	103
Условия образования берилла	104
Заключение	110
Литература	111
Таблицы	119

Фекличев Владимир Георгиевич

Берилл

*Утверждено к печати Институтом минералогии,
геохимии и кристаллохимии редких элементов*

Редактор издательства *М. П. Азизян*

Художник *Б. К. Шаповалов*

Технический редактор *Ю. П. Рылина*

Сдано в набор 23/XII 1963 г.

Подписано к печати 24/III 1964 г.

Формат $70 \times 108^{1/16}$.

Печ. л. 7,75 + 19 вкл. = 10,61 усл. л. + 19 вкл.

Уч.-изд. л. 12,8 (10,3 + 2,5 вкл.) Тираж 1200 экз.

Т. 03186. Изд. № 2518. Тип. зак. № 6012.

Темплан 1964 г. № 723

Цена 1 р. 07 к.

Издательство «Наука».

Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука».

Москва, Г-99, Шубинский пер., 10