

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

Металлургия СССР

1956

ЛЕНИНГРАДСКИЙ
ОРДENA LENINA И ОРДENA ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

ВЫПУСК 5

Под редакцией
проф. И. И. ШАФРАНОВСКОГО и проф. В. И. МИХЕЕВА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Москва 1956

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

чл.-корр. АН СССР П. М. ТАТАРИНОВ;
профессора: Д. А. КАЗАКОВСКИЙ, П. И. ГОРОДЕЦКИЙ,
В. Г. ЗДАНОВИЧ, [Ф. Н. ШКЛЯРСКИЙ],
С. Е. АНДРЕЕВ, И. Н. МАСЛЕНИЦКИЙ,
Б. А. АЛФЕРОВ, Н. И. ТОЛСТИХИН,
В. Б. КОМАРОВ, А. А. ЩУКИН;
доценты: Н. Н. СТУЛОВ, Н. М. СОКОЛОВ

Ответственный редактор Н. В. ЛЕВЕНБЕРГ

АННОТАЦИЯ

В сборнике представлены работы по вопросам общей кристаллографии, рентгенометрии кристаллов и кристаллографии минералов.

Содержание большинства статей докладывалось на Федоровских научных сессиях 1954, 1955 гг.

Сборник рассчитан на широкий круг кристаллографов и минералогов.

СОДЕРЖАНИЕ

Н. М. Соколов. О мировоззрении Е. С. Федорова	5
Г. Б. Бокий. О законе расположения атомов в кристаллах	25
В. И. Михеев, И. И. Шафрановский. Реберные формы кристаллов	37
Н. А. Горюнова, В. А. Франк-Каменецкий. О содержании понятия изоморфизм	51
И. И. Шафрановский. Кристаллы и минералообразующая среда	59
Г. Л. Вазбукций. Скульптура поверхности кристаллов берилла..	69
В. А. Мокиевский, А. В. Скропышев. Использование механических двойников при изучении генезиса кальцита	153
Ю. В. Казицын. О различных морфологических типах пирита	159
Ю. В. Казицын. Ферутил и давидит	167
И. В. Яворский. О разновидностях структуры алмаза	179
И. В. Яворский. Тонкая структура пространства обратной решетки	185
В. А. Мокиевский, И. И. Шафрановский, С. И. Гавришук, А. А. Гумилевский. Гониометрическое и структурное исследование плоскостей раскола на булях искусственного рубина	195
М. Н. Балашова, И. И. Шафрановский. Распределение минералов по видам симметрии	203
И. И. Шафрановский. История учения о формах кристаллических многогранников	213
Э. П. Сальдау. Опыты по окислению магнетита в маггемит	249
Г. А. Ковалев. Рентгеновское исследование железо-магнезиальных хлоритов	259
М. Н. Чуева. Окраска и свечение минералов в лучах ртутно-кварцевой лампы	269

H. M. СОКОЛОВ

О мировоззрении Е. С. ФЕДОРОВА

Кристаллография окончательно стала самостоятельной отраслью научного знания после выхода трудов Е. С. Федорова.

Еще в девяностых годах прошлого столетия труды Е. С. Федорова по достоинству были оценены выдающимися русскими учеными А. Гадолиным, Н. Н. Бекетовым, П. Л. Чебышевым, В. О. Ковалевским, А. С. Фаминцым, которые в 1894 г. представили его к избранию в адъюнкты Российской Академии Наук.

Имя Евграфа Степановича уже тогда было известно за пределами нашей страны. Такие ученые, как П. Грот, говорили о нем как о гордости не только русской, но и мировой науки.

Великого ученого не хотели признать только те, которым ненавистны были его прогрессивные взгляды. «В течение всей моей жизни,— писал Е. С. Федоров,— я со стороны всего, имеющего в руках власть, в том числе и со стороны Академии (Константина Романова — «августейшего» президента Академии Наук. — H. C.), встречал только пренебрежительное и отталкивающее отношение... я принужден был смотреть на свою жизнь, как на сплошную жертву» [1].

Е. С. Федорову посчастливилось дожить до лучших дней. Великая Октябрьская социалистическая революция открыла перед ним двери Российской Академии Наук, в которой он по праву занял выдающееся место среди великих людей советской науки.

Представляя Е. С. Федорова в действительные члены обновленной Академии Наук в 1918 г., А. П. Карпинский, Н. С. Кунаров, А. Н. Крылов и В. И. Вернадский указывали, что имя его пользуется самой широкой известностью: «Не существует лица, занимающегося или интересующегося минералогическими или петрографическими вопросами,— писали они,— которому бы идеи Е. С. Федорова и предложенные им методы были неизвестны, большая часть результатов, полученных Е. С. Федоровым, сделалась теперь общепризнанной» [1, лист 107].

Коммунистическая партия и Советское правительство высоко оценили заслуги Е. С. Федорова перед советской наукой. Труды Е. С. Федорова при советской власти широко публикуются. Над

его рукописями до сих пор работают советские ученые. Об отношении к Е. С. Федорову широкой научной советской общественности красноречиво говорит телеграмма коллектива Петровско-Разумовской (ныне им. К. А. Тимирязева) сельскохозяйственной академии по поводу кончины гениального ученого, последовавшей 21 мая 1919 г.: «Вместе со всей ученой Россией Петровская Академия оплакивает утрату великого ученого, имя которого пользуется мировой известностью» [1, лист 56].

I

Многогранность дарований Е. С. Федорова не случайна. Ее источник следует прежде всего искать в мировоззрении великого кристаллографа, в его взгляде на назначение науки, на долг ученого перед Родиной и народом.

Для Е. С. Федорова, как и всех подлинно великих ученых, наука не самоцель, а средство завоевания сил природы, которые должны служить человечеству.

«Столь сильно развивающиеся науки,— писал он,— не только удовлетворяют духовным потребностям человечества, но одновременно дают ему власть — направлять действующие в природе силы на пользу людей и тем самым заставить саму природу все в большей степени служить человечеству» [2].

Как прогрессивный человек, он был убежден в благородном общественном назначении науки. Наука, считал он, приводит «... к уничтожению старых предрассудков, к разоблачению людей, устраивающих из этих предрассудков свое благополучие» [3].

Враг социального паразитизма, высмеивавший, деление общества на людей белой и черной кости, считавший, что «работать должны все», Е. С. Федоров всю жизнь страстно боролся против карьеризма, разоблачал людей, присосавшихся к науке с узко личной корыстной целью. Научную деятельность он рассматривал как служение народу, как общественный подвиг, людей же науки — как людей идеи, готовых ради нее претерпеть все невзгоды, преодолеть все препятствия и, если нужно, пожертвовать жизнью.

Он сам был скромным и неутомимым тружеником, о чем свидетельствуют его 500 трудов. Он не был кабинетным ученым, замкнувшимся в узкой специальности. Глубокие теоретические построения Е. С. Федорова были не только результатом обобщения опыта других, но и личных, притом широких кристаллографических, минералогических и геологических наблюдений. Как известно, лучшие годы своей жизни Е. С. Федоров посвятил исследованию Северного Урала [4]. Преодолевая трудности, беспрерывные лишения и подчас страдания, Е. С. Федоров с небольшой группой своих сотрудников-уральцев проделал огромную работу, имеющую большое народнохозяйственное значение.

Академики А. П. Карпинский, В. И. Вернадский и Н. С. Курнаков, оценивая этот период деятельности Е. С. Федорова, указывают, что им весьма подробно изучен обширный Богословский округ, «...детально изучены рудные месторождения; выяснена их связь с геологическим строением местности, открыты новые месторождения медных, железных и марганцевых руд и золота» [1, лист 107].

Не менее важные и трудные исследования проведены Е. С. Федоровым в 1891 г. на Кольском полуострове, на побережье Белого моря.

Мысль о благе Родины, о развитии ее производительных сил была руководящей во всей научной деятельности ученого. Незадолго до смерти в последнем своем труде «Единство человечества и единство науки» он призывает на основе данных науки широко пользоваться силами, проявляющимися в природе. Говоря о возможности использования гидроэнергии, на примере Волхова он показывает, как от этого может обогатиться «наша матушка Россия».

Ненавистник казенного патриотизма царских чиновников-казнокрадов, темных дельцов биржи, зоологического национализма пуршикевичей и меньшиковых, о которых он отзывался с гадливостью и презрением, Е. С. Федоров горячо любил Россию, как ее любили А. И. Герцен, В. Г. Белинский, Н. Г. Чернышевский, Н. А. Добролюбов и другие борцы революционно-демократического лагеря.

Е. С. Федоров глубоко верил в творческие силы русского народа, выдвинувшего, как он говорил, «великих самородков — М. В. Ломоносова, А. В. Кольцова, А. М. Пешкова (Горького)», пробивших себе дорогу, несмотря на гнет царизма и неблагоприятные социальные условия.

С нескрываемым сочувствием отзывался он об освободительной борьбе народа в прошлом. Е. С. Федоров писал: «Как ни малокультурен был в то время русский народ, он... резко почувствовал социальный гнет, восстал и тем ясно доказал, что правительство, в своих попыткахrudimentации народных сил, зашло слишком далеко» [6].

Называя писателей революционеров-демократов корифеями нашей литературы, людьми высокого таланта, которые отыскали наиболее назревшую потребность исторического развития России, Е. С. Федоров писал, что имена их «навсегда останутся памятными для русских образованных людей» [5].

Уйдя в отставку из императорской академии наук, возглавляемой Константином Романовым, он бросил вызов душителям русской науки, преградившим дорогу в Академию Д. И. Менделееву и А. М. Горькому и отрешившим от профессорской деятельности И. М. Сеченова.

Насколько позволяли цензурные условия, в своих литературных выступлениях Е. С. Федоров стремился показать глубокую враждебность политики царизма интересам народа, вырождение господствующих классов. Он указывал, что всякий отживающий социальный строй душит творческие силы народа, уничтожает лучших его представителей и «способствует преобладающему влиянию менее талантливых, менее оригинальных, а иногда и прямо тупых» [6, стр. 43]. Власть, противодействующая народным силам и совершающая, по выражению Е. С. Федорова, «ретроградное движение», может лишь на время задержать развитие. Подлинную же силу имеет и прогрессивную роль играет та власть, которая может «двигаться согласно с общею массой», ибо это «приведет к ускорению общего движения» [5, стр. 37].

Е. С. Федоров глубоко верил в светлое будущее нашей Родины; в то время как кадеты, захлебываясь от восторга, славили так называемый конституционный строй, созданный царем, и, обманывая народ, пытались выдать царскую думу за орган народного представительства, Е. С. Федоров в августе 1906 г. писал: «Обращая взгляд к будущему, можно предусмотреть, что та временная форма строя, которая установится на некоторый промежуток времени, будет весьма неустойчивой», ибо она не удовлетворит те «элементы общества, коим принадлежит будущее» [6, стр. 63].

Не менее остро критиковал Е. С. Федоров и общественный строй капиталистических стран Запада. Он считал, что Англия XIX в. — это «...общепризнанное государство социальной свободы,... богатства, лицемерия, консерватизма и коварства» [6, стр. 50], а «вырождение законодательной деятельности в продажное политиканство... нигде не достигло таких уродливых форм, как именно в Америке» [6, стр. 56—57].

Еще в 80-е годы XIX в., познакомившись с рабочим движением на Западе, Федоров беспощадно разоблачил либеральную сказку об американском «рае» для рабочих, о классовом мире в этой стране.

Выступив со статьей в газете «Начало» (№ 1, 1878 г.) по поводу забастовки американских железнодорожников 1877 г., он писал: «Это было первое явление, доказавшее, что существует в Америке социальный вопрос, что и она далеко ушла, а в некоторых отношениях и перешла Европу по части организованной эксплуатации рабочего народа... Теперь и Америка пришла к тому, к чему пришли мало-помалу все европейские цивилизованные страны, — необходимости стоять за народное дело, организовать сильную и великую социалистическую рабочую партию, резко отделяющуюся от всех существующих до сих пор политических либеральных и радикальных партий буржуазного оттенка».

Горячо желая процветания и величия своей Родине, Е. С. Федоров, как и революционеры-демократы, считал, что «...истинный патриотизм никогда не был связан с ненавистью к людям иного племени или государства» [6, стр. 31]. Поэтому он всегда выступал врагом национального, колониального гнета и империалистических захватов. Он выражал сочувствие народам, подавляемым царизмом. Во время же англо-бурской войны Е. С. Федоров демонстративно отказался выступать в Лондонском королевском обществе, заявив, что не может уважать нацию, силой подавляющую независимость малых народов. Он сурово осуждал притязания германского империализма на мировое господство и предсказывал его крах.

Е. С. Федоров был убежден, что наступит время, когда народы добровольно сольются в единый союз на основе равенства.

Такие общественно-политические идеалы великого кристаллографа служили ему опорой и поддержкой в годы самой мрачной реакции и в самые тяжелые годы его личной жизни и научного творчества.

Эти прогрессивные убеждения привели Е. С. Федорова на пост первого выборного директора Горного института в годы русской революции 1905—1907 гг. В них же нужно искать источник мужества, позволившего гениальному ученому поддержать забастовку студентов-горняков, протестовавших против кровавых событий на Лене, и публично осудить режим тюрем и виселиц, о чем красноречиво свидетельствует его новогоднее пожелание в 1913 г.: «Желаю, — писал Е. С. Федоров, — чтобы пережитый исторический момент был переходным, чтобы отныне прекратился подбор, исключения свыше наиболее талантливых студентов, чтобы детей перестали делать политическими преступниками и разворачивать их в участках, чтобы мысли, неприятные для хищников, могли свободно высказываться в собраниях и в печати» [7].

Верный своим патриотическим и демократическим идеалам, Е. С. Федоров приветствовал свержение царизма и был в числе тех прогрессивных ученых, которые с первых дней Великой Октябрьской социалистической революции поставили свой талант на службу победившему народу.

II

Нельзя до конца раскрыть образа Е. С. Федорова как ученого, оценить его научные заслуги, не определив его места в той борьбе, которая развернулась в науке в конце XIX и начале XX вв.

Е. С. Федоров жил и трудился на рубеже двух эпох общественного развития и в переломный период развития науки. Как известно, конец XIX и начало XX вв. ознаменовались революцией в естествознании. Остро встал вопрос о методологии науки. Дальнейшее

развитие естествознания пришло в резкое противоречие с его старой механико-материалистической основой, несоответствие которой давало себя чувствовать на протяжении всего XIX в.

Новой методологической основой для естествознания мог быть только диалектический материализм К. Маркса и Ф. Энгельса. Обогащенный новейшими открытиями естественных наук, развитый и поднятый на высшую ступень В. И. Лениным, диалектический материализм вооружал ученых единственно научным методом материалистической диалектики, правильным пониманием новых открытий, перспектив и направления дальнейшего развития естествознания.

Но переворот в науке происходил в эпоху империализма, в эпоху загнивающего, умирающего капитализма, когда с особой остротой и проявилось несоответствие капиталистических производственных отношений характеру и уровню развития производительных сил, когда буржуазия, как говорил В. И. Ленин, повернула в сторону реакции по всей линии. В области идеологии ею поддерживались самые реакционные философские системы. Научному принципу познаваемости материального мира противопоставлялись вера, скептицизм и агностицизм.

Особо модным стал эмпириокритицизм — разновидность субъективного идеализма, начало которому положили Мах и Авенариус. В науке усиленно насаждался «физиологический», а затем «физический» идеализм, захвативший значительные круги буржуазных ученых.

Естествознание начала XX в. и в первую очередь физика переживали кризис, суть которого состояла в отступлении от прямого, решительного и бесповоротного признания объективности научных теорий.

В. И. Ленин писал: «...сегодняшний «физический» идеализм точно так же, как вчерашний «физиологический» идеализм, означает только то, что одна школа естествоиспытателей в одной отрасли естествознания скатилась к реакционной философии, не сумев прямо и сразу подняться от метафизического материализма к диалектическому материализму» [8].

Этому идеалистическому поветрию в первую очередь объявили войну передовые русские ученые, взгляды которых формировались под влиянием материалистического мировоззрения революционеров-демократов. Так, например, общезвестна борьба Д. И. Менделеева против энергетизма Оствальда, многолетняя борьба И. М. Сеченова, К. А. Тимирязева и И. П. Павлова против «физиологического» идеализма, борьба И. В. Мичурина против менделеизма. Последовательно проводили материалистическую линию в области физики и боролись с идеализмом П. Н. Лебедев, А. И. Попов, Н. А. Умов и др. Это был тот замечательный отряд людей русской науки, который продолжал и развивал материа-

листические традиции, заложенные в русском естествознании М. В. Ломоносовым.

К этому передовому отряду принадлежал и Е. С. Федоров. Участвуя в молодости в народническом движении 70-х годов, Е. С. Федоров примыкал к тем одиночкам, которые в вопросах идеологии шли не за П. Л. Лавровым и Н. К. Михайловским, а за Н. Г. Чернышевским, Н. А. Добролюбовым, Д. И. Писаревым, М. Е. Салтыковым-Щедриным.

Не случайно первая философская работа Е. С. Федорова «Перфекционизм» [5, 6] получила принципиальное одобрение М. Е. Салтыкова-Щедрина и была забракована Н. К. Михайловским.

В науке Е. С. Федоров отстаивал материалистические традиции и выступал против малейшего проявления идеалистических тенденций. Он ревностно продолжал в русской печати линию Н. Г. Чернышевского и Д. И. Писарева в борьбе за дарвинизм и в меру своих сил и возможностей стремился избавить его от мальтизианских ошибок. Он был преданным поборником учения Д. И. Менделеева в химии и стоял за его дальнейшее развитие, предлагая в изучении строения материи не ограничиваться атомом, а идти дальше [9]. Он безоговорочно поддерживал материалистическую теорию давления световых частиц на окружающие тела, созданную выдающимся русским физиком П. Н. Лебедевым.

Защищая передовую науку, Е. С. Федоров в первую очередь наносил удары по позитивизму — идеалистическому течению, прикрывающемуся ложной «заботой» об очищении естествознания от метафизики, пытавшемуся признать значение теоретического мышления в научном исследовании, насадить в естествознании голый эмпиризм, с одной стороны, скептицизм и агностицизм, — с другой.

Страстно выступая против сторонников позитивизма в естествознании, Е. С. Федоров доказал, что великие ученые всех времен руководствовались «...голосом истинного философа», и, что «...в обобщении результатов своих трудов каждый из них, сделавший на этом пути важный шаг, проявил высокий философский талант» [5, стр. 36]. Разоблачая позитивистов, болтающих об эмпирическом обобщении фактов, Федоров указывал, что, чем выше философское развитие человека науки, тем ему яснее «...что именно нужно заключить и проверить» [5, стр. 35].

Отстаивая роль теоретического мышления, Е. С. Федоров, разумеется, не придавал этому самодовлеющего значения. Он тут же подчеркивал, что «... результат философского творчества на каждом шагу этого творчества должен подвергаться проверке на опыте» [5, стр. 37]. В речи, посвященной 35-летию кристаллографии, Федоров предупреждает науку как против схоластических попыток раскрыть законы природы с помощью одной, так называ-

емой «внутренней интуиции», так и против эмпиризма, «... низводящего значение ума на простую форму для более удобного укладывания собираемого опытного материала» [10].

Эта речь направлена не только против «классического» позитивизма Конта, но и против модернизации его в современном эмпириокритицизме — махизме, прагматизме и других разновидностях идеализма.

Е. С. Федоров проявляет крайнюю степень беспокойства и недовольства тем, что «...большую силу и преобладающее значение в широких слоях получили ультраэмпирические течения под различными названиями», а также тем, что эмпиризм, позитивизм, «это ошибочное и вредное течение», и в XX в. еще «остается господствующим» в науке западных стран» [10, стр. 7]. Он призывал прогрессивных людей науки к бдительности, принципиальности и непримиримой борьбе с этим течением.

Разоблачая попытки позитивистов и махистов выбросить такие понятия, как атом, эфир, материя и другие, Е. С. Федоров спрашивает: «Что стало бы с современной наукой, если бы мы отбросили все это как метафизические бредни... если бы вместо ясной руководящей идеи, давшей как раз, особенно в последние годы, так много не только ценных, но, можно сказать, ошеломляющих открытий, современные ученые почти наобум изощрялись бы в несистематизированных и бессвязных наблюдениях и опытах?» [10, стр. 9].

С этих плодотворных материалистических позиций Е. С. Федоров подошел и к оценке положения в области кристаллографии.

Закладку основ современной кристаллографии он начал с чистки философских авгиевых конюшен в любимой и особенно близкой его сердцу отрасли естествознания.

«Ни в какой другой науке, — говорил он, — дух позитивизма не нанес более тяжелого вреда ее развитию, как именно в области кристаллографии... На первых же шагах в развитии этой науки дал себя почувствовать возросший дух позитивистского скептицизма» [10, стр. 10]. Он критикует Вейсса за игнорирование того, что было «rationальным зерном» у основоположника кристаллографии Гаюи, за то, что Вейсс, уступая духу эмпиризма, стал «делать шаги ощупью», допуская произвол, натяжки и поэтому неизбежно должен был потерпеть крах, ибо «такие попытки, — по мнению Е. С. Федорова, — противоречили истинной природе вещей» [10, стр. 11].

Особенно острой федоровской критике подвергся наумановский период кристаллографии с его резко выраженным эмпиризмом и почти полной научной бесплодностью. Господствующей в XIX в. школе, возглавляемой Науманом, Е. С. Федоров противопоставлял оппозиционные течения, из которых важнейшим было направление, идущее от выдающегося русского ученого А. Гадолина. Его

книга «Вывод всех кристаллографических систем и их подразделений из одного общего начала» подготовила крушение наумановской системы и торжество современных принципов кристаллографии.

Таким образом, в период разгула идеалистического позитивистского и махистского поветрия, когда естествознание переживало кризис, Е. С. Федоров стоял в рядах борцов против «модной» философии современной буржуазии, он был с теми людьми русской и мировой науки, которые отстаивали в ней материалистическую линию.

Материалистическое мировоззрение было тем источником творческого гения Е. С. Федорова, который дал ему возможность преодолеть господствовавшие в кристаллографии позитивистские взгляды и вывести эту науку из состояния застоя на широкую дорогу.

III

Как же великий кристаллограф конкретно решал коренные вопросы философии, а значит и методологии, естествознания?

Все выступления Е. С. Федорова по этим вопросам свидетельствуют о том, что отправным пунктом при решении любой проблемы естествознания для него было признание объективной реальности материального мира, природы. Он твердо стоял на признании несotворимости материи и движения. В противовес идеалистической теории «тепловой смерти вселенной», Е. С. Федоров отстаивал материалистический принцип: «... никакая сила не создается из ничего» [5, стр. 29]. Он последовательно и до конца жизни боролся против естественников (в том числе и кристаллографов) — махистов, оспаривавших реальность атомов. С возмущением он называл этих «ученых» педантами. Вспоминая борьбу по этому вопросу во второй половине XIX в., когда Max и его сторонники подняли обветшалое знамя берклианства и контовского позитивизма, Е. С. Федоров писал: «Одни, в том числе и автор этой статьи (чуть ли не с первых дней научной деятельности), считали косвенные фактические данные доказательством реальности таких частиц и на этом понятии строили структуру кристаллов, но были и другие, а таковых даже гораздо больше, чем первых, не признававшие атомов, которые смотрели на атомы, как на вещь более или менее фантастическую, пока прямой эксперимент... не сделал этого педантизма невозможным» [11].

Следовательно, в кристаллографии Е. С. Федоров неизменно исходил из объективного существования атомов и других микрочастиц. При таком подходе, считал он: «...кристаллическое состояние тел перестает быть загадочным, случайным явлением, но становится на почву общей закономерности, коренящейся как в химических свойствах (ее), так и в геометрической необходимости, позволяющей делать выводы математическим путем» [12].

Подвергая кристаллические тела математическому и геометрическому анализам, он требовал строгого разграничения между реальными кристаллами, существующими в природе (т. е. объективно), и идеальными, являющимися математической (логической) абстракцией от первых.

Материалистически решается Е. С. Федоровым и вопрос о соотношении материи и сознания. Отличая человека как существо, обладающее разумом, от «слепой природы», Е. С. Федоров, однако, не отрывает человека от природы. Человек рассматривается им как часть природы: «Жизнь человека, как и всякая другая жизнь, есть явление естественно-историческое. Как все явления природы, она подчинена тем же законам природы» [6, стр. 56]. Способность мышления человека не отрывается им от материальной основы. Ум имеет «...свой особый орган в организме» [6, стр. 19].

Развитие способности мышления рассматривается им как результат эволюции высокоорганизованной материи — мозга — под воздействием внешней среды и меняющихся условий существования предков человека. Е. С. Федоров приходит к выводу, что человек — живое существо, достигшее наивысшего совершенства в природе, является и наиболее «настрадавшимся» существом на протяжении всей своей естественной истории, ибо по сравнению с другими животными он был физически наименее защищенным и приспособленным.

Только развитие в борьбе с природой органа мышления вывело человека до степени существа, не только приспособляющегося к естественной среде, но и искусственно создающего для себя среду, именуемую материальной культурой.

Материалистически в основе своей решается Е. С. Федоровым и вопрос о познаваемости мира.

На протяжении всей научной деятельности Е. С. Федоров был непримиримым врагом скептицизма и агностицизма в науке. Он глубоко верил в силу науки, в ее способность на основе опыта проникнуть в «тайны природы» — глубоко изучить природу, понять «проявление ее законов». Естествоиспытатели-агностики (неокантианцы, махисты, прагматисты), эти, по характеристике Н. Г. Чернышевского, «кантовы попугаи» в науке ограничивали и сейчас ограничивают задачи науки описанием процессов, установлением статистических соотношений и в лучшем случае ответом на вопрос — что видит ученый. В противоположность им Е. С. Федоров считал, что подлинная «... наука... никогда не удовлетворится постановкой этого вопроса», что после ответа на него наука идет дальше и «ставит затем вопрос — почему...» [13], т. е. стремится раскрыть причинно-следственную связь между явлениями и объективную необходимость в природе. Он считал, что

история науки — это процесс уточнения и углубления наших знаний о природе и ее законах. Говоря, например, об объединении физических знаний «на почве закона масс и инерции», Е. С. Федоров указывал, что эти законы со временем получат более точную формулировку [5, стр. 36].

На примере развития кристаллографии Е. С. Федоров показал, что развитие науки — это бесконечный, поступательный и противоречивый процесс приближения к истине. Этот процесс неизбежно предполагает упорное сопротивление старого, борьбу старого, консервативного в науке с новым, прогрессивным, иногда сопровождающуюся даже временными поражением прогрессивного (о таких временных отступлениях свидетельствует научмановский период в кристаллографии). «Говорят,— писал Е. С. Федоров,— будто наука, высший плод человеческого гения, характеризуется плавным и твердым ходом вперед с шага на шаг... Но изложенного мною... достаточно, чтобы убедиться, что этого не дает и наука, и что на земле все, что есть, несет на себе следы всяческих человеческих слабостей и противоречий. Наука, так же как и все остальное, движется скачками. И в ней все наиболее прогрессивное встречает упорное сопротивление, пожалуй, еще хуже — полное пренебрежение. Если прогрессу в других социальных областях противодействуют гонения, преследования, то здесь, как мы видим, это заменяется не менее упорным пренебрежением» [10, стр. 14].

Отсюда Е. С. Федоров делал вывод о необходимости борьбы прогрессивных ученых с консерватизмом, групповой и кастовой замкнутостью в науке. Если в речи о 35-летии этот вывод только подразумевался, то в речи от 26 октября 1909 г., посвященной 40-летию кристаллографии, он прозвучал прямым призывом.

Разоблачая реакционную часть ученых своего времени, Е. С. Федоров показал, что в определенный период развития науки «...значительное количество официальных представителей перестает ориентироваться в успехах науки, не в состоянии приспособиться к ним и даже просто перестает их понимать.., что подбор этих представителей, вызванный прежним состоянием науки, становится все меньше и меньше приспособленным к этому прогрессивному движению науки» [14]. Такое состояние, по его мнению, ведет к кризису и обуславливает неизбежность борьбы.

Последовательная борьба за материалистические традиции в науке позволила Е. С. Федорову близко подойти к диалектико-материалистическому пониманию роли научной абстракции в процессе познания.

Разуме Е. С. Федоров отводит активную роль. Научную деятельность он понимает как творчество, притом творчество в первую очередь философское, способное точно определить понятия, которыми пользуется наука. Без этого, по его мнению, нет про-

гресса науки, ибо: «в науке представления о данном реальном предмете посреди вечных перемен в мире окружающих явлений заменялись... отвлеченными понятиями, которые, повидимому, имеют уже довольно отдаленное отношение к самому предмету, но заключают в себе новые характерные для него константы, и только к ним относится всякий вновь открытый закон» [5, стр. 32—33].

Таким образом, закон может быть открыт только с помощью абстракции. Следовательно, «научное творчество... не выдумка, а лишь результат умелого отвлечения от многих переменностей, свойственных каждому реальному явлению» [5, стр. 33].

Самая точная из естественных наук — математика, подчеркивает Е. С. Федоров, «...всегда орудует именно с такими отвлеченными, созданными понятиями» [5]. В этом «отвлечении», т. е. научной абстракции, заключена сила науки, ее способность предугадывать, предвидеть ход процессов, событий, иногда предваряя даже опыт.

Именно это имел он в виду, когда, оценивая значение творчества Гаю в кристаллографии, говорил: «Сначала предвидение... предугадывание, предвкушение истины, а затем уже настоящее ее раскрытие с его деталями» [10, стр. 6].

Е. С. Федоров совершенно правильно полагал, что только творческий ум, руководствующийся правильным методом и направляющей идеей, может избавить науку от блуждания вслепую и направить экспериментальную деятельность по правильному руслу. «Только предусматривающая, направляющая идея,— говорил он,— может привести к постановке эксперимента, бесповоротно решавшего поставленный вопрос, и чем могущественнее и обширнее действующий ум, тем глубже будет от природы истогнута скрытая в ней истина» [10, стр. 6]. Важнейшей же характеристикой такого ума он считал «...его универсальность, доступность к пониманию всякого рода случайностей» и, следовательно, всякого рода условий [5, стр. 63].

Таким образом, критерием развитости ума он считает способность правильно отражать, а значит понимать и оценивать, любые, самые различные изменения внешней обстановки и делать правильные выводы. Такая оценка роли разума и абстрактного мышления позволяет великому ученому подойти к правильному решению важнейшего вопроса теории познания — вопроса о критерии истинности познания.

Как ни велика роль разума, его способность силой абстракции раскрывать связи и закономерности в природе, исходным пунктом исследования должен быть опыт и наблюдение над внешним материальным миром. Е. С. Федоров не только исходил из объективного характера законов природы, но считал, что отражение их — законы науки — должны иметь значение объективной

истины. «Законы природы,— писал он,— несовместимы с субъективностью в методах и формулировках» [15]. Он требовал, чтобы гипотезы не отрывались от реальной почвы. Науку, по его словам, двигали лишь те ученые, которые «...сумели развить свою интуицию и согласовать ее с широчайшим опытом» [10, стр. 9]. Закон науки лишь тогда является подлинным законом, когда в основе его лежит «...опыт необыкновенно широких размеров» [15]. Он «...окончательно устанавливается только после опытной проверки» [5, стр. 95]. Следовательно, высшей и окончательной инстанцией в установлении научной истины является опыт. Как бы уточняя и развивая мысль, высказанную в «Перфекционизме», в речи о 40-летии кристаллографии, Е. С. Федоров пишет: «Когда начинают выясняться ближайшие практические следствия развиваемой теории, определяться то, что именно дает в руки власть над известным циклом явлений природы, то критерий правильности становится особенно осозаемым потому, что задача каждой науки именно достижение этой власти, а потому научно-истинно то, что дает эту власть» [14, стр. 373].

Следует сказать, что Е. С. Федоров под опытом понимает не только лабораторные исследования, но и производственную деятельность, дающую возможность переделать природу применительно к потребностям людей. Он считал, что практическая деятельность позволяет человеку ускорить процессы природы. Человек, по его словам, идет навстречу природе, но действует гораздо энергичнее и достигает в кратчайшее время того, что по естественным условиям совершается очень медленно, более того, человек создает такие вещи, предметы, «на которые... природа сама по себе является неспособной и, вероятно, никогда и нигде их не создавала» [5, стр. 48].

По стопам своих учителей — революционеров-демократов — Е. С. Федоров идет в таком важном для развития науки вопросе, как метод познания, подход к явлениям природы и, в частности, к явлениям, изучаемым науками геологического цикла.

В полном соответствии с объективной действительностью и достигнутым уровнем естествознания Е. С. Федоров рассматривал все явления и процессы природы во взаимо-обусловленности, изменении и развитии. Еще в 1915 г., опираясь на новейшие данные о строении материи, он пришел к выводу: «...что единство материи не может вызывать никакого сомнения» [11, стр. 779—780]. Эту мысль он вновь подчеркивает в своей последней статье: «Было бы большим пробелом, если бы я не упомянул об объединении всех вообще сил, действующих в природе» [3]. Это положение доказывается им на большом естественно-историческом материале.

Особо Е. С. Федоров останавливался на взаимодействии организма и среды и на вопросе о влиянии среды на живой организм. Это влияние он считал источником развития живой природы. Про-

цесс образования новых видов рассматривался им под углом зрения приспособления организмов «к новым условиям жизни», возникшим в результате геологических изменений на поверхности земли.

По мнению Е. С. Федорова, эволюция не является процессом плавного развития. Наоборот, эволюционный процесс полон противоречий, «борьбы». Виды животных и растений неспособные, в силу устойчивой наследственности, приспособиться к изменившимся условиям, неизбежно погибали. На материалах палеонтологии Е. С. Федоров показал, что эволюцию надо рассматривать как противоречивый и неравномерный процесс возникновения новых видов, иrudиментации отмирания консервативных видов, выработавших наибольшую устойчивость и приспособленность (стройность, по характеристике Е. С. Федорова) в старых условиях и поэтому неспособных изменяться и приспособиться в новых. Е. С. Федоров нанес решительный удар по извращению дарвинизма Спенсером и другими буржуазными учеными.

Исходя из диалектического принципа, что «...естественные условия суть именно условия вечных изменений» [6, стр. 61], он доказал полную научную бесплодность и несостоятельность теории устойчивости и равновесия в природе. Сущность эволюции не в стремлении к наивысшей стройности, устойчивости и равновесию организмов, а в «жизненной подвижности». Разоблачая мировоззрение Спенсера и всех сторонников «равновесия» в природе, Е. С. Федоров писал: «Смысл всех подобных мировоззрений на почве естественно-исторической эволюции сводится к признанию наибольшей прочности... Но почему-то творцы этих мировоззрений систематически просматривают тот факт, что это достигается в момент смерти.

Пока же жизнь кипит ключом, развиваются формы неустойчивые (т. е. подвижные, — Н. С.)... По этой причине введение в естественную философию понятия прочного, устойчивого как высшей задачи жизни я считаю глубоко ошибочным, жизнь никогда ничего не достигает окончательно, а вечно стремится достигнуть. Вот истинная философия природы... Если бы нашелся человек, который бы не удовлетворился этой философией природы, мы могли бы его только пожалеть, потому что он желает недостижимого, фантастического, а не реального» [6, стр. 60—61].

Выступления Е. С. Федорова против этих теорий актуальны и глубокоозвучны той борьбе, которую вели против них марксисты в годы реакции. Известно, что разоблачению теории «равновесия» и «устойчивости» В. И. Ленин посвятил специальные разделы в работе «Материализм и эмпириокритицизм». Не следует забывать, что это обветшалое оружие и сейчас используется идеологами империалистической буржуазии, для обоснования ее разбойниччьей политики.

Стремление диалектически подойти к изучению явлений природы позволило Е. С. Федорову сделать ряд серьезных выводов о направлении развития естественных наук. Е. С. Федоров считал, что единство объекта (природа, как единое целое), с одной стороны, и современный уровень естествознания, с другой, — требуют органической взаимосвязи естественных наук. Эта связь наглядно показана на примере минералого-геологических наук. «Ходом истории науки дело сложилось так, что цикл минерало-геологических наук представляет собой дугу, с одной стороны упирающуюся в центр земного шара, с другой уходящую в беспрепятственное звездное пространство. Если эта дуга... утоняется с ее обоими концами, то, наоборот, в своей средней части... она утолщается до столь гигантских размеров, что захватывает собой все физико-математические и естественные науки» [10, стр. 1].

Е. С. Федоров предугадывал, что благодаря взаимосвязи наук естествознание докажет устранение границ между миром живых организмов и миром неорганической природы.

С этих позиций Е. С. Федоров дал высокую оценку работам И. П. Павлова, указав, что они подводят естественно-научную базу под психологию и позволяют разрушить китайскую стену между явлениями материальными и психическими [17].

Исключительно плодотворные результаты дал диалектический подход Е. С. Федорова к решению вопросов кристаллографии.

Известно, что в обосновании основного закона кристаллографии — закона кристаллической однородности и связанных с ним законов — огромное значение имело правильное решение вопроса о соотношении формы и содержания кристаллов, о пространственных соотношениях частиц (молекул) в кристалле и, наконец, вопрос взаимосвязи кристаллов с окружающей его средой. Е. С. Федоров остро критиковал формальную школу в кристаллографии за то, что та ограничивалась описанием внешних кристаллических форм и фактически отрывала форму кристаллов от их материального содержания и рассматривала форму как нечто самодовлеющее.

Противопоставляя свои взгляды этой школе, Е. С. Федоров в своем наиболее полном «Курсе кристаллографии» (1901) выделил специальную главу «Соотношение между химическим составом и кристаллической формой». Он правильно поставил вопрос об определяющем значении содержания (химического состава) кристаллов для развития их формы. «Сущность закона развития форм, — писал он, — основывается не на простом каком-нибудь законе арифметического вывода более сложных индексов из простых, но обусловливается порядком плотности сеток пространственной решетки» [4, стр. 374]. Мысль о зависимости формы от содержания проведена им также и во «Введении к таблицам «Царство кристаллов».

Диалектическое решение вопроса о соотношении содержания и формы в кристаллографии подводит Е. С. Федорова к глубокому выводу о том, что «...подавляющее большинство веществ отличается удивительным постоянством важнейших форм» [2, стр. 7]. Этот капитальный вывод, основанный на анализе огромного фактического материала, накопленного кристаллографией, положил конец субъективизму и произволу в познании форм кристаллов, а вместе с ним описательному периоду в кристаллографии. Установив закон соответствия кристаллической формы химическому содержанию вещества, Е. С. Федоров дал объективную основу для определения вещественного состава кристаллов по их геометрической форме, что имеет большое практическое значение, может быть, не меньшее, «...чем возможность химиков создавать новые вещества» [2, стр. 6].

Но Е. С. Федоров не ограничивался установлением соответствия геометрической формы вещественному содержанию кристаллов. Раскрывая внутреннюю противоречивость их единства, он показал, что в действительности «... каждое вещество в отношении своей формы очень изменчиво» [2, стр. 76]. Опыт, по словам Е. С. Федорова, свидетельствует о том, что в отдельных случаях постоянно наблюдается некоторое отклонение фактического ряда (реальные кристаллы) от теоретического (идеальные кристаллы), что и придает данному веществу индивидуальные признаки. Это обстоятельство, однако, ни в какой степени не колеблет закона относительного постоянства форм, ибо при всех случайных и частных отклонениях в определенных пределах необходимость, выраженная этим законом, пробивает себе дорогу. Причины отклонения он объясняет влиянием внешней среды на процесс кристаллообразования.

Наряду с внешними условиями Е. С. Федоров указывает также на «...внутренние соотношения между молекулами кристаллов (например, расположение электрических полюсов и т. п.)» [2, стр. 17].

Таким образом, как при раскрытии внутренних (соотношение молекул), так и внешних связей (соотношение кристалла и среды) Е. С. Федоров рассматривал кристаллы в неразрывной связи с их пространственной формой. Он подверг острой критике кристаллографов школы Браве за то, что эти «...теоретики по структуре кристаллов имеют в виду в своих соображениях центр тяжести кристаллических частиц, но совершенно игнорируют среду, окружающую эти частицы» [12, стр. 370].

Этим взглядам Е. С. Федоров противопоставлял материалистический взгляд, рассматривающий пространство и время как форму существования материи и считающий, что материя и материальные тела (а значит, и кристаллы) существуют и развиваются в пространстве и времени. Такой подход дает возмож-

ность обосновать основной закон кристаллографии и правильно решить проблему прерывности и непрерывности вещества кристаллов.

Анализируя процессы кристаллообразования, Е. С. Федоров сделал очень важный вывод о том, что процесс кристаллообразования, как и развитие всех явлений в природе, скачкообразен. Теоретически обобщая опыты английского кристаллографа Майерса и свои собственные наблюдения, Е. С. Федоров установил, что эти данные свидетельствуют «...о полной невозможности представлять себе процесс кристаллизации в виде более или менее непрерывного выскакивания из раствора отдельных кристаллических частиц и укладывания их к существующему уже кристаллическому строению в строго параллельном положении... Можно считать доказанным, — подчеркивает Е. С. Федоров, — что от времени до времени начавшаяся кристаллизация быстро созидает целые пласти из строго параллельно расположенных частиц, пластинок, сразу же ложащиеся на всю грань или значительные части ее площади» [16].

Методологические указания Е. С. Федорова в области кристаллографии, как видно из всего сказанного, в принципе сохранили свое значение и поныне. Они лишь требуют дальнейшего развития на основе новых фактических данных и с позиций диалектического материализма.

* * *

Отмечая большие заслуги Е. С. Федорова в области естественных наук, его умение материалистически и диалектически рассматривать явления природы, необходимо указать и на серьезные пробелы, а в отдельных случаях, и прямую непоследовательность в его взглядах.

Правильно решая, например, вопрос о первичности материи и вторичности сознания, Е. С. Федоров не смог подняться до понимания роли труда в процессе формирования человека и человеческого сознания. Рассматривая человека преимущественно как существо естественное, он и человеческое сознание оценивал как индивидуальное, не доходя до понимания общественного сознания.

Несмотря на глубокую трактовку вопроса о практике, как критерия истинности познания, Е. С. Федоров не мог возвыситься до понимания общественной практики во всем ее объеме и содержании. Он также отступает от материализма, отходит от А. И. Герцена и Н. Г. Чернышевского и даже от своей собственной точки зрения, высказанной еще в «Перфекционизме», когда утверждает, что «...истина есть все то, в чем человек убежден», что «...составление истинного убеждения есть умственный процесс, по существу одинаковый с тем, который создал пророков» [3, стр. 8].

Даже если признать это чисто внешним сопоставлением, то и оно не оправдано и свидетельствует о известной непоследовательности.

Подобные отступления сказываются в отдельных случаях и на решении вопросов кристаллографии. Так, заявление, что «...кристалл ...есть эмблема смерти, равновесия, неподвижности», безусловно, отступление от диалектики и от действительности. Оно является тормозом для самой кристаллографии и должно быть отброшено.

Нет необходимости доказывать, что в объяснении явлений общественной жизни Е. С. Федоров, хотя и был знаком с некоторыми произведениями Маркса, но не поднялся до понимания исторического материализма, а в ряде вопросов даже и до своих учителей — революционеров-демократов. Отход от диалектики и материализма в вопросах социологических совершиенно очевиден. Возражая Спенсеру, Е. С. Федоров, хотя и говорил о недопустимости сведения законов общественных к законам природы, но в конце концов сам стал на эту позицию, пытаясь подвести явления общественной жизни под так называемый «закон перфекционизма».

Конечно, было бы неправильно, преувеличивая недостатки, зачеркивать главное и решающее в творчестве Е. С. Федорова. О великих людях науки прошлого надо судить не по тому, чего они по условиям обстановки не смогли дать, а по тому, какой вклад они внесли в сокровищницу великих дел и прогрессивных идей человечества. Если и следует упомянуть о пробелах, так только для того, чтобы предупредить увлекающихся товарищей, готовых считать Е. С. Федорова чуть ли не сознательным сторонником диалектического материализма. В такой идеализации нет никакой необходимости.

При всех недостатках во взглядах значение Е. С. Федорова состоит в том, что он шел и, безусловно, сознательно бы пришел к диалектическому материализму — к единственно верному методу и единственно верной философии естествознания.

4. Федоров Е. С. Геологические исследования в Северном Урале в 1884—1886 годах. Горный журнал. 1889, т. II.
5. Федоров Е. С. Перфекционизм. Известия С.-Петербургской биологической лаборатории, 1906, т. VIII, вып. 1, стр. 26.
6. Федоров Е. С. Перфекционизм. Известия С.-Петербургской биологической лаборатории, 1906, т. VIII, вып. 2, стр. 63.
7. Федоров Е. С. Новогодний тост. Кристаллография, вып. 3. Изд. ЛГУ, 1955.
8. Ленин В. И. Соч., т. 14, стр. 299.
9. Федоров Е. С. Попытка подвести атомные веса под один закон. Кристаллография, вып. 3. Изд. ЛГУ, 1955.
10. Федоров Е. С. Из итогов 35-летия. Речь и отчет, читанные в годичном собрании Московского сельскохозяйственного института 26 сентября 1904 г. М., 1904.
11. Федоров Е. С. Строение вещества и закон Ньютона. Природа, 1916, стр. 781.
12. Федоров Е. С. Заметка об успехах теоретической кристаллографии за последнее десятилетие. Записки минералогического о-ва, 2-я серия, т. XXVI, 1890, стр. 374.
13. Федоров Е. С. Разум и инстинкт. Природа, 1915, № 7—8, стр. 895—906.
14. Федоров Е. С. Кристаллография за сорок лет. Записки Горного института, 1910, т. II, стр. 369.
15. Федоров Е. С. Курс кристаллографии. Изд. 3-е, исправл. СПб. 1901, т. III, стр. 48.
16. Федоров Е. С. Процесс кристаллизации. Природа, 1915, декабрь, стр. 1477.
17. Федоров Е. С. «Природа и человек». Природа, 1917, № 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архив АН СССР. Ленинградское отд. Фонд 2. Опись 17, дело № 107, лист 67.
2. Федоров Е. С. Введение к таблицам для кристаллохимического анализа «Царство кристаллов». Кристаллография, вып. 3. Изд. ЛГУ, 1955, стр. 5.
3. Федоров Е. С. Единство человечества и единство науки. Архив АН СССР. Ленинградское отд. Рукопись. Фонд 2. Опись 9, дело № 13, стр. 8.

Г. Б. БОКИЙ

О ЗАКОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ АТОМОВ В КРИСТАЛЛАХ

1. Теория пространственных групп симметрии завершена работами Е. С. Федорова в 1890 г. [1] и А. Шенфлиса в 1891 г. [11, 12]. Число 230, которым исчерпываются все случаи симметрии кристаллических структур, было получено в результате длительной дискуссии и взаимной проверки выводов обоих авторов, работавших разными методами [2]. С 1913 г. появилась возможность экспериментальной проверки этой теории, приведшей, как известно, к ее триумфу.

В своей работе Е. С. Федоров широко пользовался таким важным понятием, как «правильная система точек (фигур)»¹, введенным в кристаллографию Л. Зонке. Теперь уже известно, что как раз по точкам правильных систем располагаются атомы в кристаллических структурах.

Развитие методики определения атомных структур кристаллов вызвало необходимость изображения пространственных (федоровских) групп симметрии и указания типов ПСТ, которые могут встречаться в данных конкретных группах. Эта по существу техническая работа была проделана рядом авторов и сведена в наиболее распространенном справочнике по рентгеноструктурному анализу [13], к сожалению, без ссылки на первого автора теории — Е. С. Федорова [3].

2. Несмотря на то, что со времени опубликования работы Е. С. Федорова прошло более 60 лет и со времени первого издания международных таблиц [13] — более 30 лет, обобщения по геометрии ПСТ до сих пор не сделано. До сих пор неизвестно ни их число, ни типы взаимного расположения точек в ПС. ПСТ до сих пор не табулированы и не имеют названий или описаний. Мы не знаем, в каких случаях следует пользоваться федоровским термином «правильная система фигур», в настоящее время почти оставленным, а в каких — «правильная система точек». Всегда ли возможна замена понятия ПСФ понятием ПСТ, как это делается во всех современных справочниках, учебниках и оригинальных работах?

¹ В настоящей статье термин «правильные системы точек» или «фигур» пишется сокращенно ПСТ или ПСФ.

До сих пор нет сводок по распределению атомов химических элементов по ПСТ, хотя и имеется несколько сводок о распространенности и дан ряд конкретных примеров кристаллических веществ, имеющих ту или иную пространственную группу симметрии [6].

Можно только догадываться, что существует большая селективность правильных систем точек. По некоторым из них весьма часто располагаются атомы элементов в химических соединениях, другие в настоящее время не могут быть иллюстрированы конкретными примерами.

Мы до сих пор не знаем о связях, отношениях, аналогиях между понятием ПСТ (Φ) и другими родственными понятиями из геометрической теории структуры кристаллов. В каких случаях существующие аналогии отражают существенные отношения и когда они становятся формальными?

3. Все перечисленные вопросы, неясности и недоработки по геометрии ПСТ связаны, повидимому, с общей недооценкой значения этого понятия и его роли в теории атомного строения кристаллов. Это понятие например, не встречается в монографии Б. Ф. Ормента «Структуры неорганических веществ» [5].

Творческая мысль исследователей была направлена в основном на изучение симметрии. В этой области за последние годы появилось несколько серьезных и интересных работ. Но за это время не вышло в свет ни одной работы по ПСТ. Однако именно ПСТ (Φ) являются конкретными носителями материи, по этим точкам располагаются атомы в кристаллическом веществе, а симметрия является лишь формой нахождения этой материи или фоном, на котором распределены определенным образом конкретные материальные частицы.

Почему же сам Е. С. Федоров не завершил учения о ПСФ? На этот вопрос нетрудно ответить. В период вывода Е. С. Федоровым 230 пространственных групп симметрии и в последующие годы (90-е годы XIX в.) сделать окончательное заключение о значении ПСТ было трудно, так как не существовало еще экспериментального метода, позволяющего подтвердить правильность ранее полученных выводов. Работа Е. С. Федорова опередила науку того времени. Как известно, сам Е. С. Федоров думал даже, что выведенные им асиморфные группы нереальны [1].

В 1916 г. после первых сообщений об экспериментальном определении атомных структур кристаллов Е. С. Федоров вновь вернулся к вопросу о роли пространственных групп в кристаллических структурах и попытался найти закон целых чисел для атомных структур [6]. «Этот закон, — писал Е. С. Федоров, — требует для своего выражения некоторых трех кристаллографических осей, по которым, так же как в законе Гаюи, мы должны определить некоторые единичные отрезки. и тогда можем сказать,

что точки, занимаемые атомами, есть точки рациональные по отношению к этим осям, т. е. их три координаты рациональны или, иначе, выражаются отношением целых чисел в единицах длины, представленных в единичных отрезках» [6, стр. 435].

Сформулированный Федоровым закон, как известно, оказался неверным. Эта работа интересна тем, что показывает, как Е. С. Федоров интуитивно чувствовал существование такого закона, искал его. Первая причина ошибки Федорова заключалась в том, что он не знал всех конкретных случаев ПСФ (Т). Закончив вывод 230 пространственных групп симметрии, он не стал заниматься выводом всех случаев ПСФ, так как эта задача являлась чисто технической. Она была впервые осуществлена Вайковым в 1922 г. [14] уже после смерти Е. С. Федорова. Полная сводка всех ПСТ была затем опубликована в 1935 г. [13].

Второй причиной ошибки явилось то обстоятельство, что в начале XIX в. рентгеноструктурный анализ переживал еще младенческий период. Определенные к этому времени атомные структуры кристаллов были настолько простыми (в большинстве случаев беспараметрическими), что для них координаты атомов действительно составляли целые доли параметров решетки. Е. С. Федоров эти частные случаи принял за общий закон.

4. Большой экспериментальный материал, существующий в настоящее время, позволяет значительно полнее осветить проблему расположения атомов в кристаллах и сформулировать закон этого расположения, включающий как неотъемлемую часть раздел о целочисленности.

Сущность закона расположения атомов в кристалле может быть изложена следующим образом. Атомы в кристаллическом пространстве расположены по точкам (фигурам) правильных систем. Точки соответствуют граням или центрам простых форм кристаллов, если эти центры совмещены с особыми точками структуры, в частности с узлами решетки. Каждую простую форму можно представить в виде соответствующего ей точечника (рис. 1). Кратности правильных систем точек (фигур) равны числам граней простых форм. Простые формы (точнее, точечники, им соответствующие) в симморфных федоровских группах симметрии целиком сохраняются, во всех других группах они расчленены на части, представляющие собой также простые формы с числом граней, кратным числу граней исходной формы. Эти части распределены по кристаллической решетке так, что координаты центра простой формы составляют целые доли параметров решетки, равные составляющим переносов элементов симметричности. Обычно координаты следующие: 000, $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$, $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$.

$00 \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \frac{1}{4} 0$ и т. п.

Точки наиболее частных ПС с низкими кратностями располагаются не по граням простых форм, а по центрам простых форм. Они совпадают в этом случае с узлами решетки или с другими особыми точками структуры (например, центрами симметрии) и

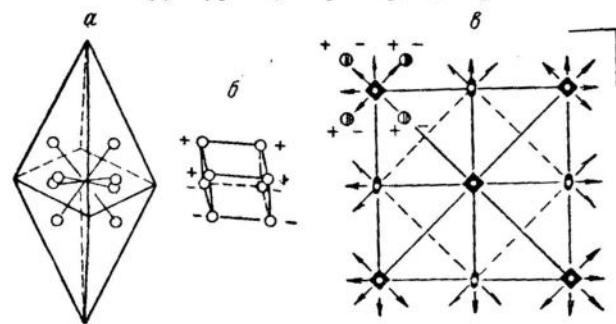


Рис. 1. Простая форма кристалла и соответствующий ей точечник:

a — тетрагональная дипирамида с перпендикулярами, опущенными из центра на ее грани; *б* — соответствующий точечник; *в* — правильная система точек 8 (*r*) в федоровской группе *P4/mmm*, соответствующая тетрагональной дипирамиде

имеют координаты, также составляющие целые доли параметров решетки.

Так выражается закон целочисленности в кристаллохимии.

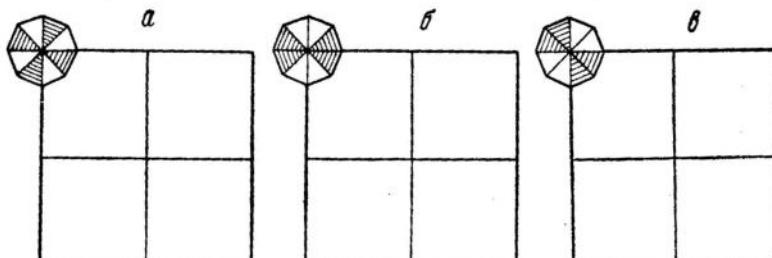


Рис. 2. Различные случаи расчленения дитетрагональной дипирамиды (вид сверху):

a — на две тетрагональные дипирамиды; *б*, *в* — на две «ромбические» дипирамиды различной ориентировки (заштрихованные части фигуры опущены на $\frac{1}{2} c$)

5. Ниже я постараюсь иллюстрировать сказанное несколькими примерами, конкретизирующими закон, и остановлюсь подробнее на некоторых деталях.

Рассмотрим прежде всего правильные системы точек с кратностью 16 в примитивной тетрагональной решетке. Этот пример удобен потому, что в тетрагональной сингонии может быть один

шестнадцатигранник — дитетрагональная дипирамида. Соответствующий ей шестнадцативершинник или шестнадцатиточечник будет иметь координаты точек $\{xyz\}$. В табл. 1 собраны все ПСТ с кратностью 16 и группы, в которых они встречаются. Во всех случаях точки ПС разбиваются на группы, соответствующие частям дитетрагональной дипирамиды. На рис. 2, *a* показано расчленение дитетрагональной дипирамиды на две тетрагональные. Заштрихованные части фигуры опущены на $\frac{1}{2} c$. На рис. 2, *б* приведено расчленение дитетрагональной дипирамиды на две «ромбические»¹ дипирамиды. Одна из них (заштрихованная) спущена на $\frac{1}{2} c$. Вторая ориентировка «ромбических» дипирамид показана на рис. 2, *в*. Число всех ПСТ, являющихся разновидностями дитетрагональной дипирамиды, будет 16.

Из всех 16 групп таблицы только одна симморфная *P4/mmm* (36 *s*, по Е. С. Федорову), в ней дитетрагональная дипирамида не расчленена.

Из приведенного примера видно, в каком смысле проявляется аналогия между понятием ПСТ и простой формой. На эту аналогию многократно указывалось раньше [7, 8]. Нельзя согласиться с мнением Н. В. Белова [9, стр. 5], что понятие координационного полиэдра в теории атомного строения кристаллов аналогично понятию простой формы в учении о кристаллических многогранниках.

При определении числа разновидностей ПСТ надо иметь в виду неоднозначность трактовки некоторых из них. В качестве примера рассмотрим группу симметрии (рис. 3). Если координаты *x*, *y* и *z* мало отличаются от нуля, то точечник, образованный около начала координат, будет скalenоэдром. Если же одна из координат *x* или *y* близка к $\frac{1}{2}$, то точечником будет дитетра-

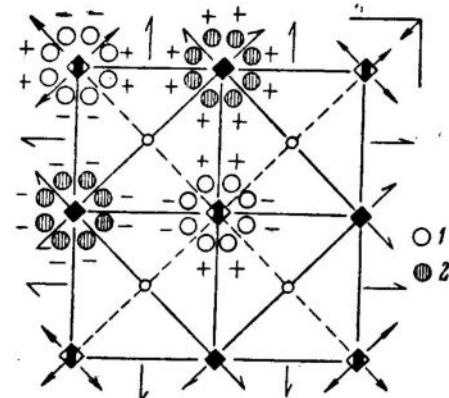


Рис. 3. Различная интерпретация точечника (xyz) при изменении координаты *x* в федоровской группе *P4/mmm*:

1 — от ~ 0 ; 2 — до $\sim \frac{1}{2}$

¹ В том случае, когда часть фигуры не является простой формой данной сингонии, она в названии ставится в кавычки.

Таблица 1

Тип расчленения	Дополнительные координаты центра	Федоровская группа
Дитетрагональная дипирамида (не расчленена)	только 000	$P\ 4/mmm$ (1)
Две тетрагональные дипирамиды	$00 \frac{1}{2}$ (рис. 2, а) $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$	$P\ 4/mcc$ (2) $P\ 4/m\bar{v}m$ (3) $P\ 4/mnc$ (4)
Две «ромбические» дипирамиды	$00 \frac{1}{2} *$ (рис. 2, б, в) $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} *$	$P\ 4/mmc$ (5); $P\ 4/mcm$ (6) $P\ 4/m\bar{v}m$ (3а) $P\ 4/mnm$ (7); $P\ 4/mmc$ (5а)
Два тетрагональных трапециоэдра	$00 \frac{1}{2}$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$	$P\ 4/mcc$ (2а) $P\ 4/n\bar{v}m$ (8) $P\ 4/nnc$ (9)
Два тетрагональных скаленоэдра	$00 \frac{1}{2} *$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0*$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} *$	$P\ 4/mmc$ (5б); $P\ 4/mcm$ (6а) $P\ 4/nmm$ (10); $P\ 4/n\bar{v}m$ (8а) $P\ 4/nmc$ (11); $P\ 4/nnm$ (12)
Две дитетрагональные пирамиды	$\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$	$P\ 4/nmm$ (10а)

Продолжение табл. 1

Тип расчленения	Дополнительные координаты центра	Федоровская группа
Четыре тетрагональные пирамиды	$00 \frac{1}{2};$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0;$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} **$	$P\ 4/ncc$ (13а)
Четыре «ромбические» пирамиды	$00 \frac{1}{2};$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0;$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} ***$	$P\ 4/ncm$ (14а)
Четыре тетрагональных тетраэдра	$00 \frac{1}{2}; \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0;$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} **$	$P\ 4/ncc$ (13); $P\ 4/ncm$ (14) $P\ 4/ncc$ (15); $P\ 4/mcc$ (16а)
Четыре «ромбических» тетраэдра	$00 \frac{1}{2}; \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0;$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} ***$	$P\ 4/ncc$ (15а); $P\ 4/ncc$ (15б) $P\ 4/ncc$ (13б); $P\ 4/ncm$ (14б); $P\ 4/mcc$ (16б)
Четыре «ромбические» призмы	$00 \frac{1}{2}; \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0;$ $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} ****$	$P\ 4/mcc$ (16); $P\ 4/mcc$ (16в); $P\ 4/ncm$ (14в)

* Возможны две различные ориентировки точечника. ** Возможны четыре различные ориентировки. *** Возможны пять различных ориентировок. **** Возможны три различные ориентировки.

гональная пирамида. Очевидно, в случае увеличения x до $\frac{1}{4}$ (рис. 3) полученный точечник может быть с равным основанием интерпретирован и как дитетрагональная дипирамида и как тетрагональный скаленоэдр¹.

¹ Различные трактовки одной ПСТ обозначены в табл. 1 буквами, добавленными к соответствующему номеру ПСТ.

Для той же группы $P4/nmm$ могут быть и иные распределения точек в пространстве: если, например, координаты x и y принимают значения, близкие к $\frac{1}{4}$, а z примерно равно 0, т. е. точки группируются возле центров инверсии. В этом случае распределение точек в пространственной решетке будет таким, что получающийся точечник (если за его центр взять центр инверсии) будет иметь меньшее число точек, чем в разобранных выше двух случаях (4 вместо 8). При подсчете числа ПСТ такие случаи на первой стадии исследования мы не учитывали и ограничили задачу подсчетом числа точечников с максимально возможным числом точек для данной пространственной группы. В каждом же конкретном случае этот вопрос может быть решен однозначно в зависимости от величины межатомных расстояний, наличия в структуре молекул или радикалов и т. п.

Непрерывный переход одних простых форм кристаллов в другие тоже принципиально возможен [10]. Таким образом, аналогия между ПСТ и простой формой, о которой говорилось выше, и в этом случае имеет место.

Если переходить к ПСТ все с меньшей и меньшей кратностью, то аналогия между ПСТ и простой формой в некоторых случаях теряется. В предельном случае при кратности 1, которой отвечает простая форма — моноэдр, эта аналогия может стать уже чисто формальной. В некоторых сингониях (например, ромбоэдрической или кубической) нет даже этой формальной аналогии, так как там нет одногранных простых форм. В этих случаях точки ПС расположены по узлам решетки и соответствующая ПСТ будет уже аналогична не простой форме, а решетке. Однако и в этих случаях эти понятия остаются только аналогичными, но отнюдь не тождественными, как это неправильно принимается некоторыми авторами. При расщеплении точечника расщепляется и его центр, который всегда симметричнее, чем отдельные точки точечника. Расщепление центра точечника возможно на части, кратные величине его симметрии. Оно может быть продолжено до тех пор, пока получающаяся точка не станет асимметричной. Число таких точек будет, очевидно, в этом случае равно величине симметрии центра точечника.

6. Исходными простыми формами ПСТ с кратностью 8 в примитивной решетке тетрагональной сингонии могут быть все 5 восьмигранников (дитетрагональная призма, дитетрагональная пирамида, тетрагональная дипирамида, тетрагональный трапециоэдр и тетрагональный скаленоэдр).

Нерасщепленных тетрагональных дипирамид, например, может быть уже три — различной ориентировки: две в той же 36 с группе с координатами xxz и oyz и в группе $P4/m$ (28 с, по Е. С. Федорову) с координатами xyz . Точки этих ПС имеют раз-

ную симметрию — m и 1 соответственно. Чем ниже кратность ПС, тем больше число подразновидностей ПСТ, отличающихся симметрией точек.

В примитивной тетрагональной решетке, кроме перечисленных выше ПСТ с одной из пяти указанных выше исходных восьмигранных простых форм, существуют ПСТ, у которых исходными простыми формами оказываются сразу несколько одинаковых форм с числом граней меньшим восьми. Число этих форм является делителем величины кратности ПСТ. При кратности системы 8 такими делителями будут 2, 4 и 8. В нашем примере это

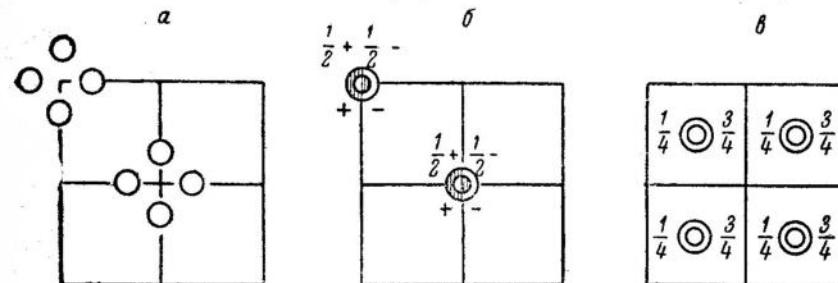


Рис. 4. Правильные системы точек с кратностью 8, интерпретирующиеся простыми формами с меньшим числом граней:

a — две тетрагональные призмы; *b* — четыре пирамида; *c* — восемь моноэдров равных «решеток»

будут изображенные на рис. 4 две тетрагональные призмы, четыре пирамида и восемь моноэдров (или «решетка» с $a' = \frac{a}{2}$ и $c' = \frac{c}{2}$). На рис. 5 последняя форма изображена как ПСТ (*a*) и ПСФ (*b*). На рис. 5, *c* та же ПСФ показана в проекции вместе с элементами симметрии соответствующей пространственной группы.

ПС такого типа особенно интересны. Если их построить из точек и не учитывать симметрию, то получающиеся системы обычно можно описать иной решеткой. Так, например, система точек $0, \frac{1}{2}0, \frac{1}{2}\frac{1}{2}$ в группе $P4/nmm$ будет иметь дополнительную трансляцию $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ и ячейку с объемом $v' = \frac{1}{2}v$, а система точек $0, 0, \frac{1}{2}$ в группе $P4/ncc$ может быть описана в центрированной ячейке. Как ПСТ она будет тождественна соответствующей ПСТ центрированной решетки (например, (000) в группе $J4/mmm$), как ПСФ обе такие системы будут различными. Все такие правильные системы будут верно интерпретированы только при учете симметрии точек или, другими словами, при рассмотрении их как правильных систем фигур, а не точек.

7. В каких же случаях целесообразно пользоваться термином ПСФ и в каких ПСТ? Можно ли их отождествлять? Какие преимущества и недостатки у этих терминов друг перед другом? Насколько верно они отражают те понятия, которые вкладываются в эти термины?

Какой смысл вкладывается в геометрическое понятие точки? Это, прежде всего, безразмерный образ. Положение точки в пространстве определяется тремя координатами. Эвклидовы точки

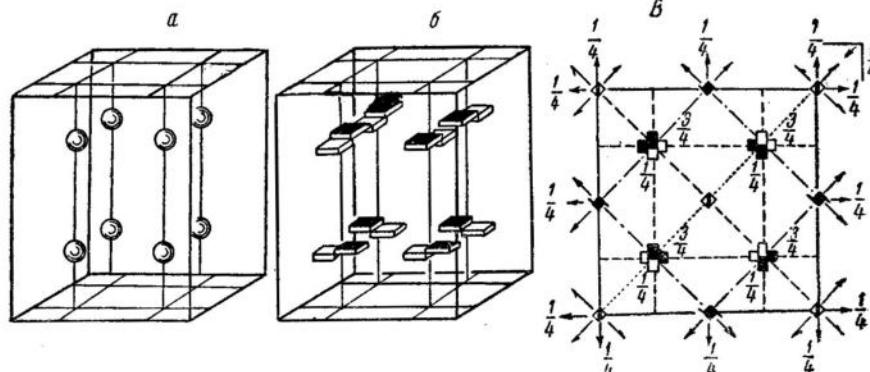


Рис. 5. Система точек с координатами $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$ в группе $P4/nvc$, изображенная в виде:

a — правильной системы точек; *b* — правильной системы фигур; *c* — проекции.

при наложении всегда совпадают. Очень часто в кристаллографии молчаливо принимают (специально не оговаривая), что точка имеет симметрию шара.

В какой мере эти свойства точки отражают свойства точек (фигур) правильных систем? Положение их в кристаллическом пространстве всегда определяется только тремя координатами как точки или центра сферы. Однако далеко не всегда они имеют сферическую симметрию. Игнорировать симметрию точек (фигур) правильных систем нельзя. В разобранном примере дитетрагонально дипирамидальных ПСТ точки во всех случаях имели симметрию 1, т. е. были асимметричными. Однако ни одну из этих ПС по расположению точек нельзя спутать с другой ПС, нельзя этим ПС приписать и иную решетку Бравэ. Следовательно, в этих и аналогичных случаях употребление термина ПСТ не приведет к недоразумениям. Хотя именно в этих случаях считать эти точки сферически симметричными нельзя. Образом их будет асимметричная фигура — например, прямоугольный треугольник, имеющий лицо и изнанку. Федоровский термин, таким образом, более строг. Однако фигуры ПС не являются обычными

трехмерными фигурами, так как их положение в пространстве определяется тремя координатами. Они отличаются от эвклидовых фигур безразмерностью, т. е. точки (фигуры) правильных систем безразмерны как точки и симметричны как фигуры. Поэтому они не являются ни эвклидовыми точками, ни эвклидовыми фигурами. Их правильнее всего было бы называть симметричными точками, или сокращенно «симтами». Эти точки не обладают общим свойством совпадения при наложении. Они совпадают только в том случае, если при наложении совпадают все их элементы симметрии. Если в одной федоровской группе переходит от ПС с большей кратностью к ПС с меньшей кратностью, то «точки» будут при этом сливаться на элементах симметрии и при этом сами будут приобретать симметрию этого элемента.

По симметричным точкам правильных систем располагаются атомы химических элементов, т. е. тела безусловно трехмерные. В рентгеноструктурном анализе нет прямого метода, позволяющего определить их форму и симметрию, поэтому они всегда определяются только тремя координатами. Атомы даже одного химического элемента, если они располагаются в кристаллической структуре в положениях с разной симметрией или вообще в разных ПС, не могут быть совмещены друг с другом никакими симметрическими преобразованиями.

Правильные системы симметричных точек во многих случаях можно отличать друг от друга по определенным погасаниям на рентгенограммах. Так, например, будут отличаться те правильные системы симметричных точек (ПССТ), в которых все точки лежат в одной, двух и т. д. плоскостях элементарной ячейки. Особое значение по рентгеновским погасаниям имеют те системы, которые интерпретируются как правильные системы фигур.

Выход всех разновидностей ПССТ и их табулирование позволили бы завершить геометрическую теорию структуры кристаллов Е. С. Федорова. Эта работа начата нами с Е. М. Романовой, и первая часть ее будет подготовлена к печати в ближайшее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров Е. С. Симметрия и структура кристаллов. «Классики науки». Изд. АН СССР, 1949.
2. Бокий Г. Б. и Шафрановский И. И. «Е. С. Федоров. Из переписки Е. С. Федорова с А. Шенфлисом и Ю. В. Вульфом». Научное наследство, т. II. Изд. АН СССР, 1951, стр. 297—354.
3. Белов Н. В. Великий русский кристаллограф и его детище. «Классики науки». Изд. АН СССР, 1949, стр. 580—587.

4. Новацкий В. 50 лет общей теории структуры кристаллов. Симметрия и физико-химические свойства кристаллических соединений. Распределение кристаллических структур между 219 пространственными группами. См. Ниггли П. Стереохимия. ИЛ, 1949, стр. 317—352.
5. Ормонт Б. Ф. Структуры неорганических веществ. Гостехтеоретиздат, 1950.
6. Федоров Е. С. Основной закон кристаллохимии. Известия АН, 1916, стр. 435—454.
7. Бокий Г. Б. и Порай-Кошиц М. А. Практический курс рентгеноструктурного анализа. Т. 1, изд. МГУ, 1951.
8. Бокий Г. Б. Введение в кристаллохимию. Изд. МГУ, 1954.
9. Белов Н. В. Структура ионных кристаллов и металлических фаз. Изд. АН СССР, 1947.
10. Бокий Г. Б. и Цинобер Л. И. Рентгеноструктурное исследование кобальтина, герцдорфита и ульманита. Труды Института кристаллографии АН СССР, 1954, вып. 9, стр. 239—250.
11. Schönflies A. Krystalsysteme und Krystallstruktur. Leipzig, 1891.
12. Schönflies A. Theorie der Kristallstruktur. Berlin, 1923.
13. Internationale Tabellen zur Bestimmung von Krystallstrukturen. Berlin, 1935.
14. Wyckoff R. W. G. The Analytical Expression of the Theory of Space Groups. Washington, 1922 (Второе издание, 1930).

**Ленинградский горный институт
Кристаллография, вып. 5, 1956 г.**

В. И. МИХЕЕВ, И. И. ШАФРАНОВСКАЯ

РЕБЕРНЫЕ ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ

Сообщение второе

ПРОСТЫЕ РЕБЕРНЫЕ ФОРМЫ ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ СИНГОНИИ

В первом нашем сообщении о реберных формах кристаллов уже отмечалось, что до сих пор внимание кристаллографов в первую очередь привлекали грани на кристаллах [3]. Геометрическое учение о кристаллических формах всецело основывалось на понятии простых форм — совокупностей граней, выводящихся одна из другой с помощью элементов симметрии. При этом почти совсем выпадали из поля зрения не менее важные элементы ограничения кристаллов — ребра.

Ясно, что с помощью элементов симметрии можно вывести совокупности равных ребер аналогично тому, как при выводе обычных простых форм находятся совокупности равных граней.

Совокупности равных ребер кристаллов, выводимых с помощью элементов симметрии, мы назвали простыми реберными формами.

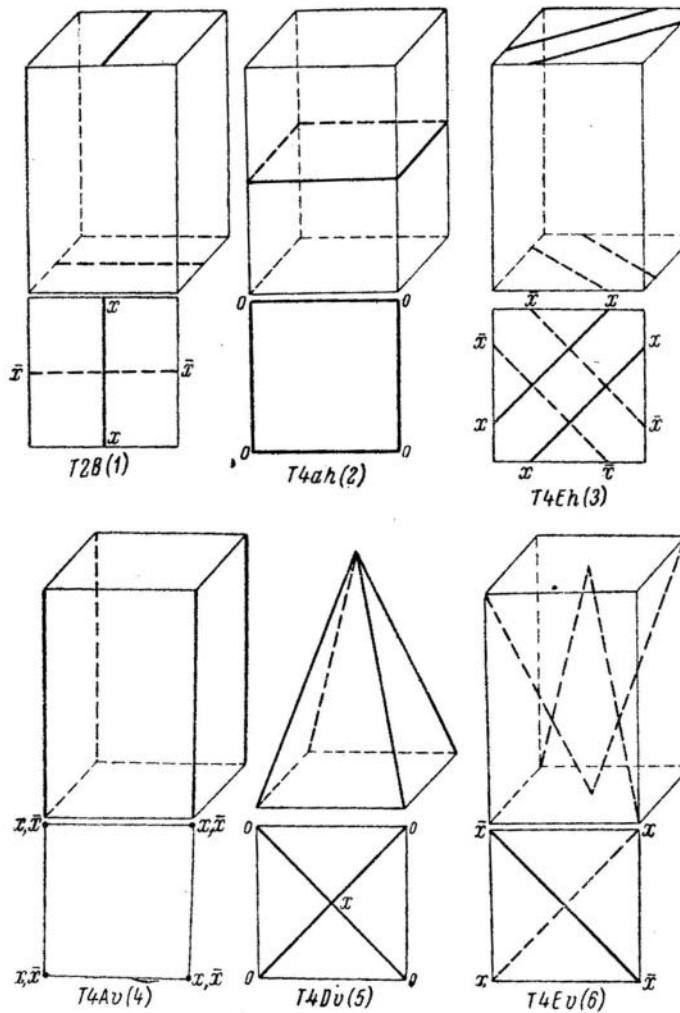
В первом сообщении были даны понятия о способах вывода таких форм и приведены результаты вывода 18 простых реберных форм низших сингоний.

Настоящая заметка дает результаты вывода 54 простых реберных форм для тетрагональных кристаллов. В табл. 1 даны изображения этих форм. В связи со сложной конфигурацией некоторых из них обычные изображения пришлось дополнить ортогональными проекциями ребер на горизонтальную плоскость. Изображения реберных форм даны в порядке возрастания числа их ребер. При одинаковом числе ребер сперва идут формы с горизонтальными ребрами, затем — с вертикальными и, наконец, — с косыми.

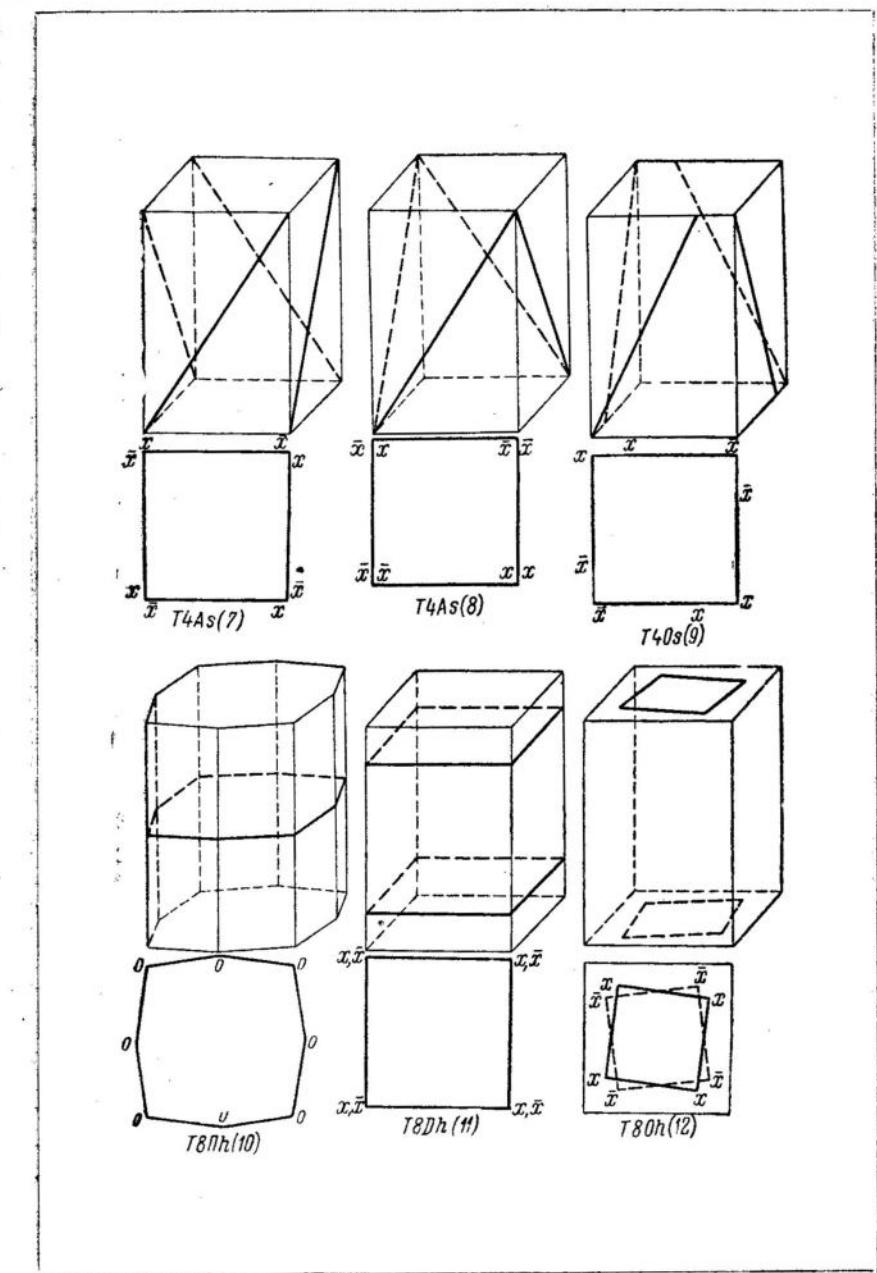
Как видно из табл. 1, реберные формы тетрагональных кристаллов могут быть двухреберниками, четырехреберниками, восьмireберниками и шестнадцатиреберниками. Количественное распределение этих форм следующее:

Число ребер формы	2	4	8	16
Число форм	1	8	33	12

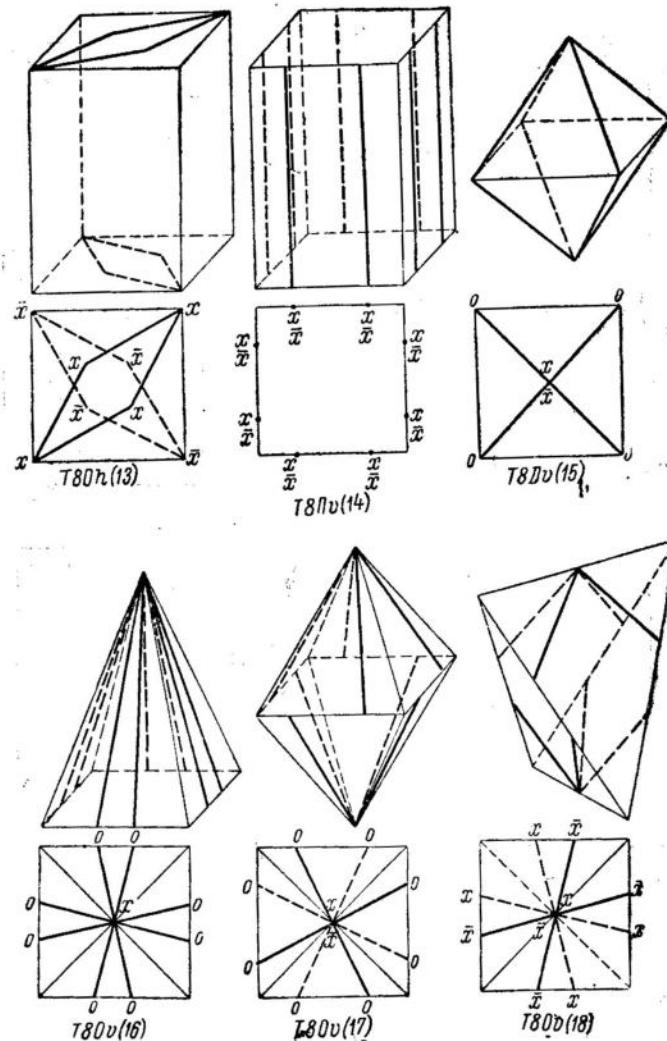
Таблица 1



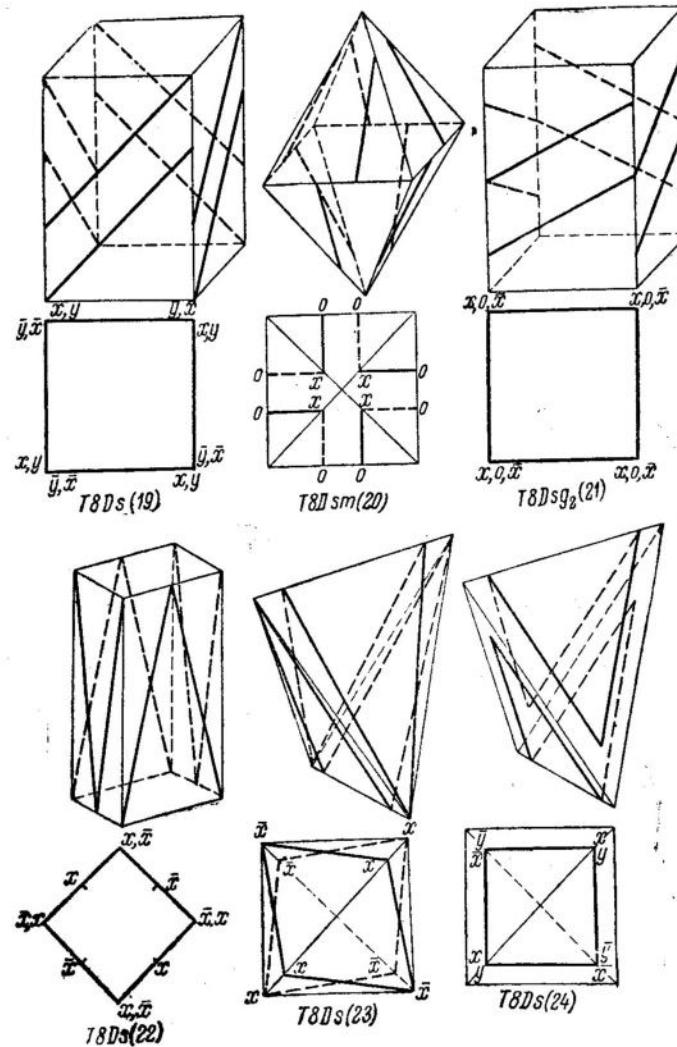
Продолжение табл. 1



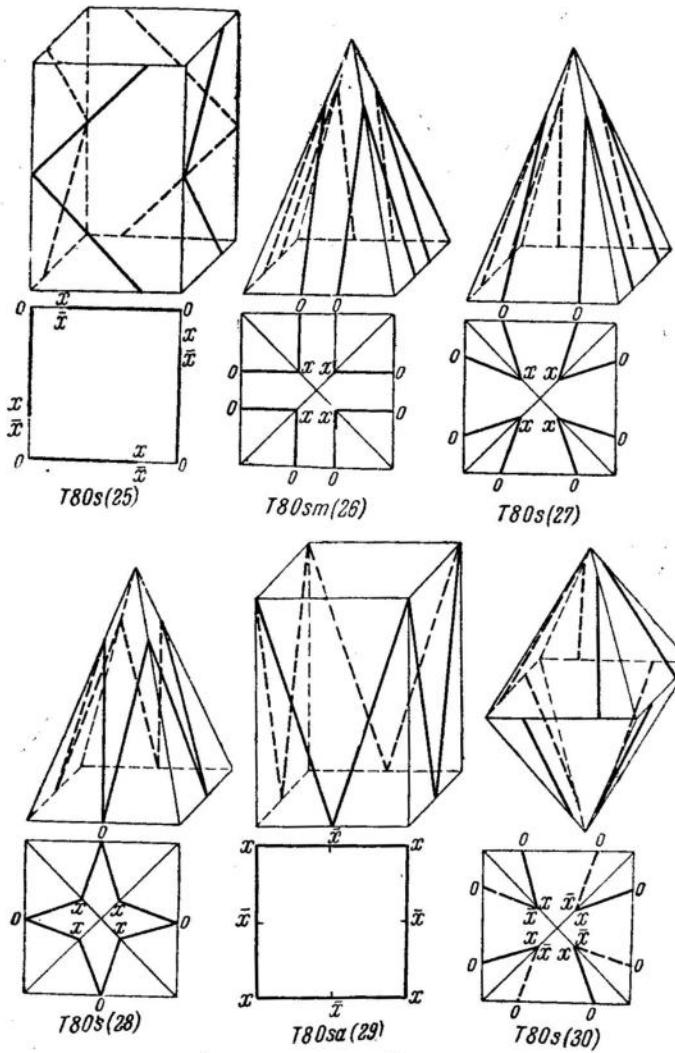
Продолжение табл. 1



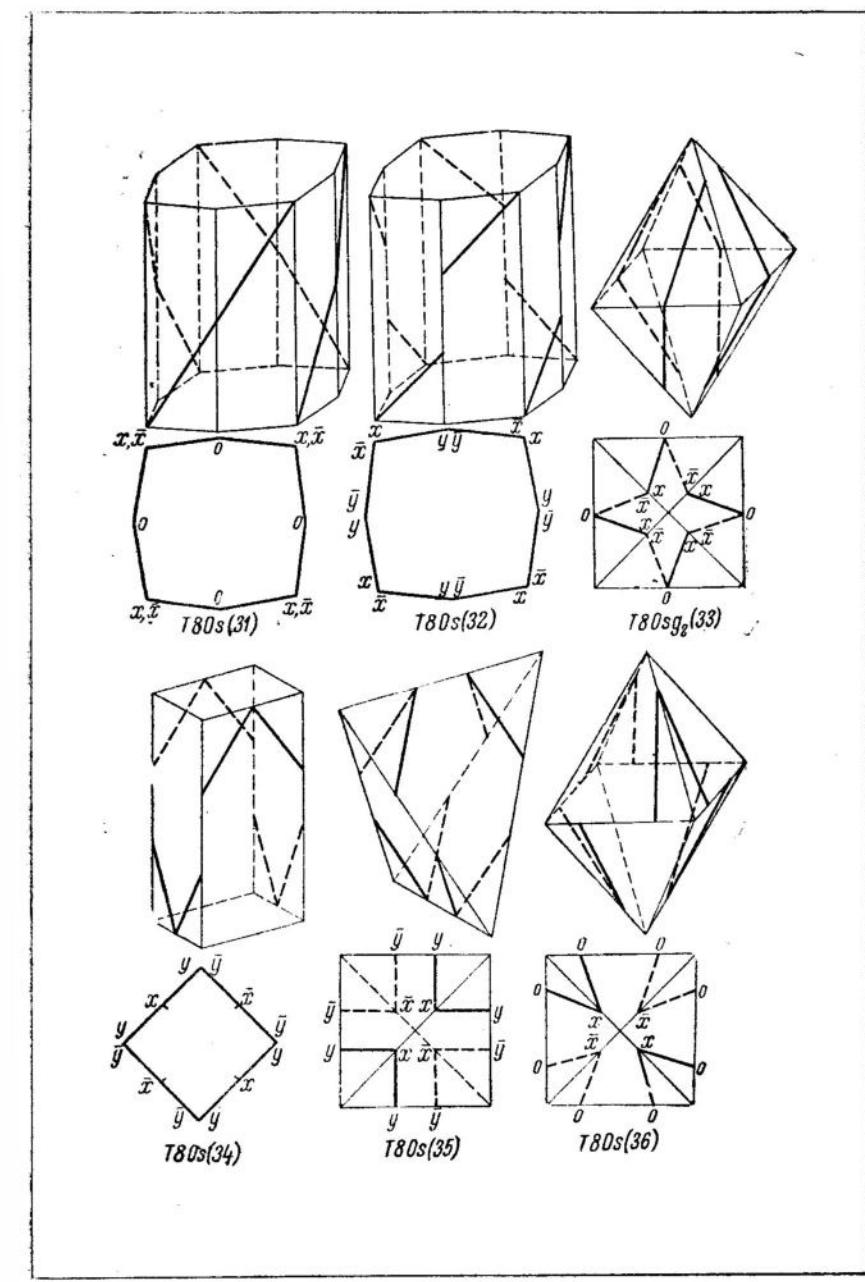
Продолжение табл. 1



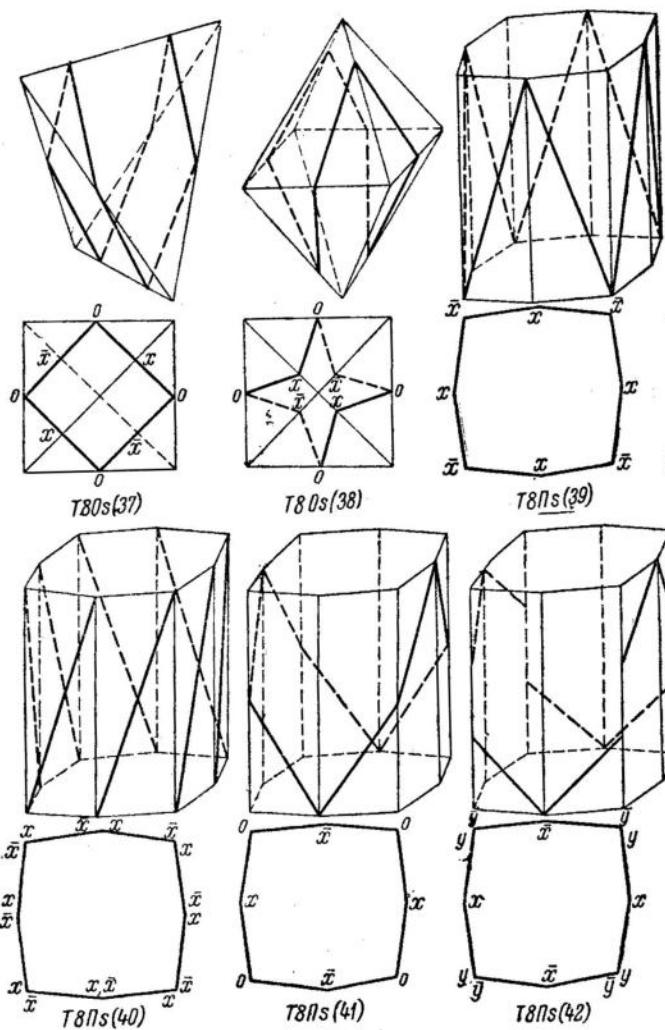
Продолжение табл. 1



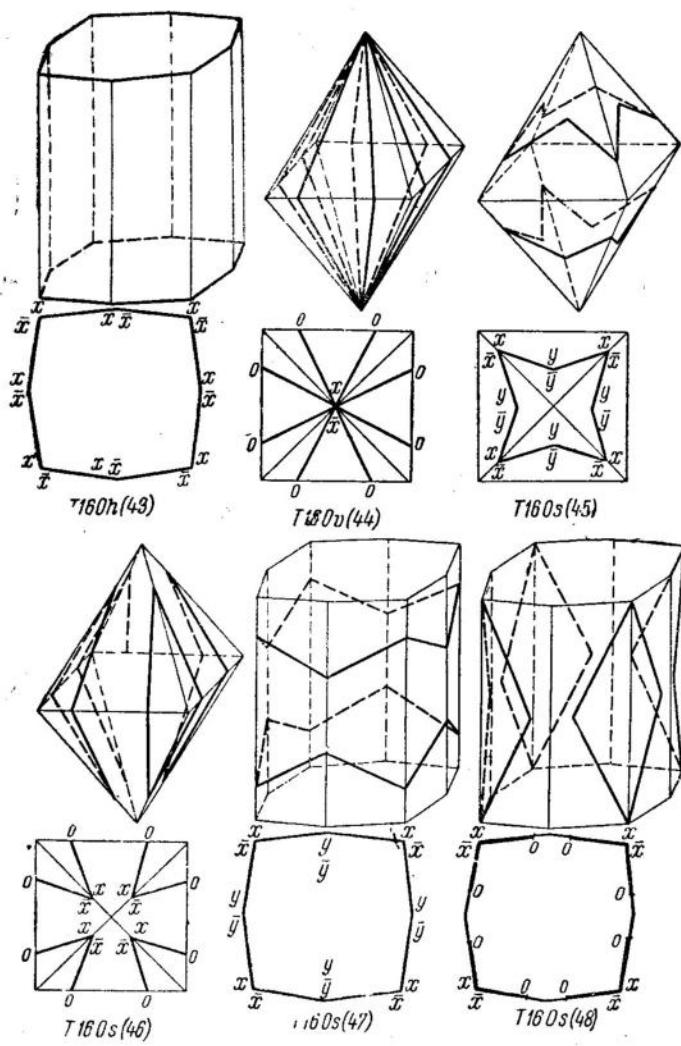
Продолжение табл. 1



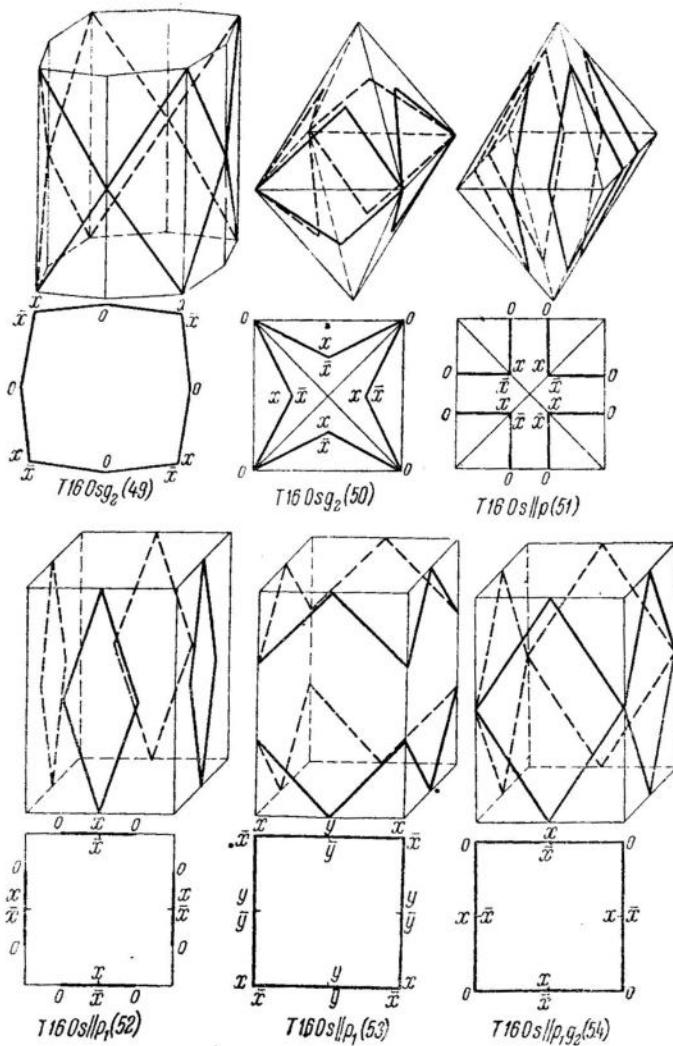
Продолжение табл. I



Продолжение табл. I



Продолжение табл. I



Значительное число форм с одинаковым числом ребер весьма затрудняет их классификацию. Поэтому мы отказались от попытки дать словесные обозначения и ограничились нумерацией и специальными определяющими символами. Чтобы получить понятие о способе построения таких символов обратимся к рис. 1. На нем посредством стереографической проекции показаны возможные положения точек на сфере. Они отличаются своим положением относительно элементов симметрии для всех семи видов симметрии тетрагональной сингонии.

В целях обобщения возможные вертикальные плоскости симметрии и горизонтальные двойные оси изображены прямыми линиями. Согласование этих прямых с конкретными элементами симметрии того или иного вида симметрии должно соответствовать общепринятым правилам установки тетрагональных кристаллов.

Как видно из рис. 1, следует различать семь различных положений точек: B , D , A , O , E , M , Π . В каждой из этих точек можно провести несколько прямых (ребер), касательных к сфере проекции, различно ориентированных в пространстве (в плоскости, перпендикулярной к главной оси симметрии; в плоскости, проходящей через главную ось симметрии; в плоскости, идущей перпендикулярно двойной оси, косо относительно элементов симметрии и т. д.). В каждом из этих случаев будет выводиться некоторая простая реберная форма. Рассмотрев все возможные случаи для семи видов симметрии тетрагональной сингонии и вычеркнув повторяющиеся одинаковые формы, мы и найдем общее число простых реберных форм тетрагональной сингонии в числе пятидесяти четырех.

Таким образом, рис. 1 дает простую возможность осуществить вывод простых реберных форм для тетрагональных кристаллов. Этот же рисунок служит и для получения символов простых реберных форм.

В общем виде принятый нами символ простой реберной формы имеет вид

$$TNKl(n),$$

где T — обозначение тетрагональной сингонии;

N — число ребер данной формы;

K — обозначение точки касания ребра к шару (B , D , A , O , E , M , Π);

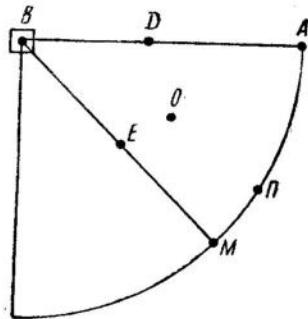


Рис. 1. Гномостереографическая проекция граней тетрагональных кристаллов

l — пространственная ориентировка ребра (*h* — ребро лежит горизонтально в плоскости, перпендикулярной к главной оси симметрии; *v* — ребро лежит в вертикальной плоскости, проходящей через главную ось симметрии; *s* — ребро лежит в косорасположенной плоскости);

n — порядковый номер формы по табл. 1 (в скобках).

В некоторых символах перед последней цифрой отмечается положение ребер относительно *g₂* и *P*.

В качестве примера приведем символ простой реберной формы по табл. 1

T4 Dv (5).

Из приведенного символа выясняется принадлежность формы к тетрагональной сингонии (буква *T*), затем указывается ее принадлежность к четырехреберникам (цифра 4), далее следует точка касания ребра к шару проекции (буква *D*). Буква *v* показывает, что ребро данной простой формы лежит в вертикальной плоскости, проходящей через главную ось симметрии. Наконец, последняя цифра (5) указывает номер этой формы в табл. 1.

При определении простых реберных форм на кристаллических многогранниках необходимо учитывать, в каких именно видах симметрии возможна та или иная простая реберная форма. В связи с этим в табл. 2 показано распределение простых реберных форм тетрагональной сингонии по соответственным видам симметрии.

Все указанное выше относилось к геометрическим простым реберным формам, аналогам геометрических граничных простых форм. Вывод реберных форм на основе видов симметрии позволяет попутно найти и все кристаллографические разновидности реберных форм, являющихся аналогами кристаллографических разновидностей простых граничных форм, выведенных Г. Б. Бокилем [1].

В тетрагональной сингонии сумма кристаллографических разновидностей простых реберных форм равна 86.

В заключение приведем рисунки некоторых кристаллов, показывающих реальное значение простых реберных форм.

На кристаллических многогранниках некоторых минералов отдельные реберные формы иногда особенно резко выявляются с помощью процессов частичного растворения (травления). Рис. 2 изображает кристалл халькопирита с сильно разъединенными ребрами формы *T4As* (8). На рис. 3 дан кристалл апофиллита с сильно разъединенными реберными формами *T160s* (45) и *T4Av* (4).

С помощью таких протравленных ребер, принадлежащих одной и той же реберной форме, в некоторых случаях можно уточнить вопрос о принадлежности кристалла к тому или иному виду симметрии.

g₄ — 4 реберные формы

2, 4, 5, 7

g₄PC — 5 реберных форм

2, 4, 11, 15, 25*

g₄4P — 11 реберных форм

2, 4, 5, 10, 14, 16*, 26*, 27*, 28*, 29*, 39*

g₄4g₂ — 17 реберных форм

2, 4, 7, 10, 11, 12*, 14, 15, 17*, 19*, 20*, 21*, 30*, 31*, 32*, 33*, 40*

g₄4g₂5PC — 18 реберных форм

2, 4, 10, 11, 14, 15, 43*, 44*, 45*, 46*, 47*, 48*, 49*, 50*, 51*, 52*, 53*, 54*

g₄4 — 7 реберных форм

1, 2, 3, 4, 6, 8, 9*

g₄2g₂2P — 22 реберные формы (24 разновидности реберных форм)

1, 2, 3, 4, 6, 8, 11, 13*, 14, 15, 18*, 22*, 23*, 24*, 34*, 35*, 36*, 37*, 38*, 41*, 42*

П р и м е ч а н и е. Номера форм соответствуют указанным в табл. 1.
Формы, встречающиеся только в данном виде симметрии, отмечены звездочкой.

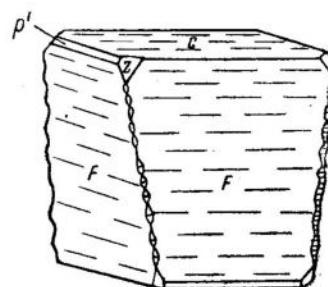


Рис. 2. Сильно разъединенные ребра кристалла халькопирита

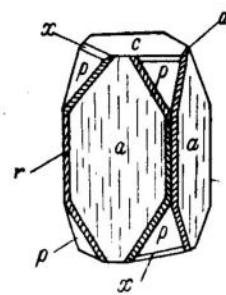


Рис. 3. Сильно разъединенные ребра кристалла апофиллита

Рис. 2, 3, заимствованные из «Определителя кристаллов» А. К. Болдырева и др. [2], наглядно показывают важность учета простых реберных форм при изучении кристалломорфологии минералов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бокий Г. Б. Число физически различных простых форм кристаллов. Труды лаборатории Кристаллографии АН СССР, 1940, вып. 2.
2. Болдырев А. К., Доливо-Добровольский В. В., Шафрановский И. И. и др. Определитель кристаллов. Т. 1, 1-я половина. ОНТИ. 1937.
3. Михеев В. И. и Шафрановский И. И. Реберные формы кристаллов. Сообщение первое. Простые реберные формы низших сингоний. Минералогический сборник Львовского геологического о-ва, 1955, № 9.

**Ленинградский горный институт
Кристаллография, вып. 5, 1956 г.**

Н. А. ГОРЮНОВА, В. А. ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ

О СОДЕРЖАНИИ ПОНЯТИЯ ИЗОМОРФИЗМ

В 1954 г. исполнилось 160 лет со дня рождения Эйльгардта Митчерлиха, 135 лет назад создавшего учение об изоморфизме.

Интересно отметить, что самый термин «изоморфизм» был предложен Митчерлихом совместно с Берцелиусом, в лаборатории которого, еще молодым человеком работал Митчерлих. В то время еще не был сформулирован периодический закон, и открытие изоморфизма было научным событием большой важности.

Д. И. Менделеев, избравший изоморфизм темой своей кандидатской диссертации, придавал ему громадное значение как средству для открытия сходства и различия соединений, как средству для суждения о внутреннем мире частиц.

С открытием изоморфизма были поставлены первостепенные вопросы кристаллохимии — о закономерностях, связывающих кристаллическую форму и химический состав, и о возможности и пределах изоморфных замещений. Полностью эти вопросы не решены и до сих пор.

Изоморфизмом Митчерлих называл сходство кристаллических форм химически сходных веществ. В понятие изоморфизма была включена и способность веществ к совместной кристаллизации в виде так называемых смешанных кристаллов, содержащих переменные количества исходных веществ, а также способность одного вещества служить затравкой для перекристаллизации другого вещества из раствора.

Д. И. Менделеев определил изоморфизм как «сходство форм и способность вызывать кристаллизацию» [8].

После открытия в 1912 г. дифракции рентгеновских лучей кристаллами учение об изоморфизме вместе с кристаллохимией вступило в новую fazу.

Основатели современных представлений об изоморфизме (Х. Г. Гримм, В. М. Гольдшмидт, А. Е. Ферсман, В. Г. Хлопин, Б. А. Никитин и др.) обобщили накопившийся экспериментальный материал по этому вопросу уже с точки зрения внутреннего строения кристаллов. Представления об изоморфизме, оказавшиеся чрезвычайно плодотворными, проникли в ряд смежных наук, например: в радиохимию, геохимию, физику твердого тела, органическую химию и т. д.

В связи с этим особенно важно устранить некоторые противоречия и разнобой в понятиях, имеющихся как в старых работах, так и особенно часто встречающихся в работах недавнего времени, трактующих об изоморфизме в смежных с кристаллохимией областях. Эти противоречия неоднократно подвергались критике, например, В. С. и О. С. Соболевыми [12], В. И. Лебедевым [6], П. В. Грушвицким [5] и др.

В. М. Гольдшмидт [3] употреблял термин «изоморфизм» в двух смыслах: в широком и узком смысле слова, понимая под первым лишь аналогию кристаллического строения, а под вторым такую аналогию кристаллического строения, которая приводит к образованию смешанных кристаллов. Р. К. Эванс в «Введении в кристаллохимию» [16], ссылаясь на Гольдшмидта, уже трактует изоморфизм чисто формально или, как он сам пишет, «чисто физически», отмечая, что «...с точки зрения внутреннего строения вещества можно дать более точное определение изоморфизма, и мы, следуя Гольдшмидту, будем считать изоморфными вещества с аналогичной кристаллической структурой» [16]. И дальше: «Для многих приведенных далее примеров чисто геометрические основания изоморфизма являются общим принципом». По Эвансу PbS и NaCl изоморфны, т. е. под изоморфизмом Эванс понимает то, что мы сейчас обычно называем изоструктурностью. Такое понимание изоморфизма нашло довольно широкое распространение в физической и отчасти химической периодической литературе. Обычно в других областях наук (геология, минералогия, геохимия) эти два понятия не смешиваются.

А. Ф. Уэллс, разбирая различные критерии изоморфизма, пишет: «Кристаллы, в которых существует одинаковое расположение геометрически-подобных структурных единиц, — изоморфны... только такое определение изоморфизма является удовлетворительным» [15].

Таким образом, в книгах Эванса и Уэллса гольдшмидтовский «изоморфизм в широком смысле слова» стал синонимом изоструктурности и перерос в «единственно удовлетворительное» определение изоморфизма. Между тем такое формально геометрическое определение изоморфизма как изоструктурности не включает основного содержания понятия, обогащенного со временем Митчерлиха всем дальнейшим развитием кристаллохимии. Прямое отождествление изоморфизма с изоструктурностью должно быть отвергнуто с самого начала. Следует отметить, что и в других случаях при рассмотрении проблемы изоморфизма часто встречается переоценка роли геометрического фактора и недооценка влияния характера взаимодействия между структурными единицами на изоморфизм.

Более распространено понимание изоморфизма, близкое к идеям Митчерлиха. По Р. Гримму и В. М. Гольдшмидту, изо-

морфизм веществ определяется сходством типа их химической формулы, сходством абсолютных размеров ионов, типа связи и типа кристаллической решетки [3].

Гримм и Гольдшмидт дают также и некоторую количественную характеристику изоморфизма — известные пределы изоморфных замещений, подчиняющиеся так называемому правилу Гримма-Гольдшмидта.

В свете имеющихся новых данных необходимо вернуться к обсуждению понятия «изоморфизм».

1. Область явлений, относимых к изоморфизму, значительно расширилась. Сейчас к ним, часто не совсем верно, относят образование твердых растворов внедрения [1], а также образование смешанных кристаллов по типу субмикроскопических прорастаний [9, 10, 17].

Перестали быть исключениями случаи изоморфизма таких гетероструктурных веществ, как CaF_2 и YF_3 и других [11]. Число примеров таких случаев «аномального изоморфизма» стало слишком велико.

Все это приводит к мысли, что необходимо объединить все случаи изоморфизма каким-либо общим признаком и исключить из этой области явления смежного характера.

Таким общим признаком, повидимому, должно служить прежде всего сходство структур в отношении объемных размеров определенных строительных единиц, а также близость геометрического типа кристаллической структуры и типа химической связи [4, 21], которые могут приводить к образованию смешанных кристаллов и взаимной кристаллизации (затравочное воздействие). Таким образом, те твердые растворы [10, 12], которые основаны на принципе замещения, замещения с заполнением пространства и вычитания относятся к области изоморфизма.

Этим ограничением из области изоморфизма исключаются твердые растворы внедрения типа карбидов и нитридов металлов [14], так как их образование основано не на сходстве, а на разнице в геометрических и энергетических характеристиках исходных веществ. Исключаются также субмикроскопические прорастания и ориентированные наросты как явления, для которых достаточно двумерного и даже одномерного подобия. Исключаются и микрокосмические смеси¹ и другие образования типа твердых растворов, где отсутствует структурное подобие.

С другой стороны, такие более сложные случаи образования смешанных кристаллов, как у $\text{MgF}_2 - \text{LiF}$ и $\text{CaF}_2 - \text{YF}_3$, которые до сих пор рассматривались как исключения, могут восприниматься как обычные случаи изоморфной смесимости.

¹ Микрокосмические смеси В. И. Вернадского [2], не поддающиеся пока точному исследованию, вероятно, могут относиться к различным типам твердых растворов.

2. Стало совершенно ясно, что такие разные термины, как *твёрдые растворы замещения и изоморфные смешанные кристаллы*, отражают не принципиальную разницу в природе соответствующих веществ, а просто различные направления исследования (физико-химическое и минералогическое) [12]. Необходимо выяснить границу соприкосновения этих двух направлений. Очевидно, образование всех изоморфных смешанных кристаллов может быть интерпретировано с физико-химической точки зрения и в соответствующих терминах.

Вместе с тем, кажется разумным при описании явлений изоморфизма предпочесть термин *изоморфные смешанные кристаллы*, так как далеко не все типы твердых растворов находят себе аналогии в изоморфных смешанных кристаллах (например, твердые растворы внедрения, твердые растворы в цеолитах и пр. — см. о них у И. Д. Старынкевич-Бориeman [13]) и только твердые растворы замещения относятся к ним.

Для обозначения той или иной степени смесимости удобно пользоваться терминами физико-химического анализа, привлекая к рассмотрению соответствующие диаграммы состояния (как это сделано, например, В. С. Соболевым и О. С. Соболевой [12], а также учитывать термодинамические условия. Многие системы, где при различных условиях изоморфная смесимость различна, могут быть точно описаны в терминах физико-химического анализа.

3. Количественная трактовка явлений изоморфизма (начиная с известных пределов изоморфных замещений Гримма и Гольдшмидта) до последнего времени касалась в основном только соединений с ионным типом связи. Она учитывала различия структур с точки зрения геометрических размеров. На этой основе и осуществлялось деление изоморфизма на совершенный (полная смесимость) и несовершенный (ограниченная смесимость). Роль поляризуемости впервые попытался учесть количественно Б. А. Никитин [9]. Он же первый высказал мысль о том, что пределы замещения могут быть значительно шире, если силы, связывающие частицы в кристалле, слабее. Это он показал на примере изоморфного замещения узлов CO_2 и SO_2 атомами инертных газов в молекулярных решетках. Б. А. Никитин первый указал на важность для изоморфных замещений не только близости типа связи, но и относительной силы связи.

Определение изоморфизма чаще всего не может носить количественного характера, так как нужна еще большая экспериментальная работа по выяснению пределов возможных изоморфных замещений для различных в энергетическом отношении систем. Это одна из основных задач кристаллохимии на ближайшее время.

Основными признаками, определяющими изоморфизм, нужно считать сходство: а) объемных размеров; б) типа химической связи и в) типа структуры.

Под сходством объемных размеров подразумевается сходство атомных, ионных или молекулярных объемов, размеров ячеек или топических параметров. Без объемного подобия изоморфизм невозможен.

При сходстве типа химической связи у изоморфных веществ пределы изоморфизма обязательно обусловливаются характером связи и зависят от него [4, 9, 21].

Говоря о сходстве типов структуры, необходимо привести типы смешанных кристаллов, которые возможны при кристаллохимически различных изоморфных замещениях.

1. НОРМАЛЬНЫЕ ЗАМЕЩЕНИЯ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫЕ В РАМКАХ ОДНОТИПНОЙ ПРАВИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТОЧЕК

A. Простое замещение (изовалентное)

В качестве примеров таких замещений можно привести случаи замещения среди металлов (рис. 1) с одним типом структуры ($\text{Ag} - \text{Au}$ и др.), а также типичные случаи замещений среди галогенидов щелочных металлов (рис. 2), построенных по типу

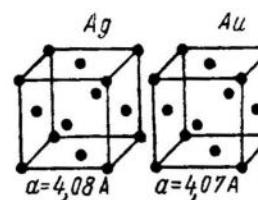


Рис. 1. Структура серебра и золота

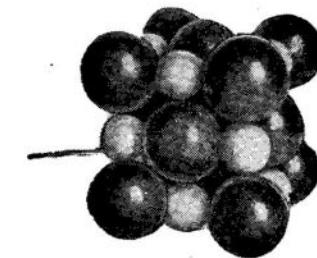


Рис. 2. Структурный тип хлористого натрия

хлористого натрия ($\text{KCl} - \text{KBg}$, $\text{NaCl} - \text{AgCl}$ и др.).

В более сложных структурах аналогичные случаи встречаются среди минералов группы оливина ($\text{Mg}_2\text{SiO}_4 - \text{Fe}_2\text{SiO}_4$) или шпинели ($\text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{FeFe}_2\text{O}_4$ и т. д.).

B. Связанное замещение (гетеровалентное)

К таким замещениям относятся многочисленные случаи гетеровалентного изоморфизма среди искусственных соединений ($\text{LiNO}_3 - \text{MgCO}_3 - \text{ScBO}_3$ [19]) и минералов (моанцит CePO_4 —

крокоит $PbCrO_4$ [20]; оливин $(Mg, Fe)_2SiO_4$ — трифиллит $Li(Fe, Mn)PO_4$ [23] и альбит $NaAlSi_3O_8$ — анортит $CaAl_2Si_2O_8$, где замещение происходит по схеме: $NaSi \rightleftharpoons CaAl$. Среди случаев нормального замещения можно встретить примеры, где замещающие друг друга исходные структуры в различной степени отличаются друг от друга (принудительная кристаллизация).

2. УСЛОЖНЕННЫЕ ЗАМЕЩЕНИЯ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫЕ ПРИ ПЕРЕХОДАХ ОТ ОДНОЙ ПРАВИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТОЧЕК К ДРУГОЙ

A. Замещение с добавлением (с заполнением пространства) или вычитанием

Такие более сложные для расшифровки случаи изоморфизма можно иллюстрировать следующими примерами.

1. $LiF \rightleftharpoons MgF_2$ [18] или $LiCl \rightleftharpoons MgCl_2$ [19], где в обоих случаях имеется один кубический тип плотнейшей упаковки с заполнением всех (LiF , $LiCl$) или половины (MgF_2 , $MgCl_2$) октаэдрических пустот (рис. 3). При образовании смешанного кристалла по схеме $M_2^+F_2 \rightarrow M_2^{++}F_2$ и сохранении плотнейшей упаковки изменяется число «заселенных» октаэдрических пустот от 0,5 до 1,0.

2. Корунд $\gamma Al_2O_3 \rightleftharpoons$ шпинель $MgAl_2O_4$, где замещение с добавлением или вычитанием осуществляется по схеме: $Al_8O_{12} \rightleftharpoons Mg_3Al_6O_{12}$ ($Al_8 \rightleftharpoons Mg_3Al_6$) в общем структурном мотиве.

К этому же типу относятся изоморфные замещения, наблюдавшиеся в слюдах $Mg_3^{++} \rightleftharpoons Al_2^{++}$, где это связано с заменой в слое гидрагиллитового мотива $Al(OH)_3$ на брусситовый $Mg(OH)_2$ или обратно.

B. Замещения с заменой положения

При таком типе замещения тот или иной компонент структуры (*a*), попадая в другую структуру (*b*), занимает там иные положения.

Так, например $AgBr$ (структура типа хлористого натрия, рис. 2) образует при нагревании (230°) смешанный кристалл с $CuBr$ (структура типа сфалерита, рис. 4), где статистически размещены ионы Cu

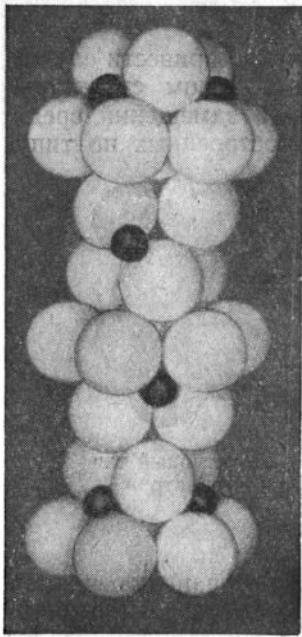


Рис. 3. Структура хлористого магния

в тетраэдрических, а ионы Ag в октаэдрических пустотах на фоне общей кубической плотнейшей упаковки.

Как указывалось выше, эти довольно разнообразные случаи образования усложненных смешанных кристаллов раньше считались исключениями.

* * *

Следует отметить, что в зависимости от условий образования в результате замещений могут возникать неупорядоченные, а иногда и упорядоченные системы.

Такие системы, где неупорядоченного состояния быть не может (двойные соли), мы в согласии с В. С. Соболевым исключаем из области изоморфизма (например, доломит — $CaMg(CO_3)_2$ и др.).

Из области явлений, относящихся к изоморфизму, исключаются также и следующие случаи:

1. Так называемые смешанные кристаллы нового рода [17], например $BaSO_4 - KMnO_4$, где обнаруживаются субмикроскопические прорастания, тождественные эпитаксическим прорастаниям, отличающиеся от них только размерами.

2. Аномальные смешанные кристаллы [24, 25], где соблюдается только дву- или даже одномерное подобие. Образование такого рода кристаллов относится к области эпитаксии, но не изоморфизма.

3. Твердые растворы внедрения, которые образуются не вследствие сходства в исходных веществах, а, наоборот, благодаря различию геометрических размеров частиц.

Следовательно, изоструктурность как критерий при рассмотрении возможности изоморфизма непригодна. В то же время для изоморфизма требуются определенные черты структурного подобия, которые прежде всего связаны с сохранением объемных соотношений.

Попытаемся дать удовлетворяющее приведенным выше ограничениям определение понятия изоморфизма.

Изоморфизм — сходство структур в отношении объемных размеров определенных элементов структуры при близости геометрического типа структуры и характера связи, что дает возможность соответствующим структурным единицам (атомам, ионам, радикалам, молекулам) при определенных условиях кристаллизации занимать одинаковое или сходное положение в узлах общей кристаллической решетки, образуя соединения переменного состава.

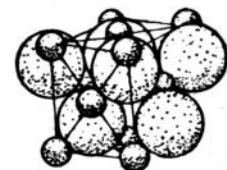


Рис. 4. Структурный тип сфалерита

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Н. В., Бокий Г. Б. Современное состояние кристаллохимии и ее ближайшие задачи. Первое совещание по кристаллохимии. Изд. АН СССР, 1954.
2. Вернадский В. И. Парагенезис химических элементов в земной коре. Дневник XII съезда русских естествоиспытателей и врачей, СПб., 1910.
3. Гольдшмидт В. М. Кристаллохимия. Перев. под ред. В. Хлопина. Госхимиздат, 1935.
4. Горюнова Н. А., Котович В. А. и Франк-Каменецкий В. А. Рентгеновское исследование изоморфизма некоторых соединений геллия и цинка. ДАН СССР, 1945, т. 103, № 4, стр. 659—662.
5. Грушвицкий П. В. К вопросу о связи между химическим составом и кристаллическим строением. Ученые записки ЛГУ, 1954, № 178, стр. 227—229.
6. Лебедев В. И. О состоянии кислорода, химической связи в силикатах и пр. Вестник ЛГУ, 1948, № 3, стр. 17—30.
7. Лебедев В. И. Несколько замечаний по поводу работы П. В. Грушвицкого. Ученые записки ЛГУ, 1954, № 178, стр. 231—239.
8. Менделеев Д. И. Основы химии. Изд. 8-е. 1906, стр. 249.
9. Никитин Б. А. Изоморфизм и твердые растворы. Успехи химии, 1944, т. XIII, вып. 6.
10. Никитин Б. А. Изоморфные замещения в ионных решетках простых соединений. Сборник, посвященный акад. В. И. Вернадскому. 1936, т. 1, стр. 77—88.
11. Ормонт Б. Ф. Строение неорганических веществ. Госхимиздат, 1950.
12. Соболев В. С. и Соболева О. С. Физико-химическая трактовка изоморфизма. Научные записки Львовского Гос. Университета, серия химических наук. 1948, т. IX, вып. 1, стр. 5; 1949, т. XIII, вып. 2.
13. Старынкевич-Бориeman И. Д. Изоморфные и неизоморфные замещения в минералах. Известия АН СССР, серия геологическая, 1951, № 6, стр. 153—157.
14. Франк-Каменецкий В. А. Кристаллохимия. Глава в книге О. М. Аншелеса «Начала кристаллографии», Изд. ЛГУ, 1952, стр. 209—246.
15. Уэллс А. Ф. Структуры неорганических веществ. ИЛ, 1949.
16. Эванс Р. К. Введение в кристаллохимию. Госхимиздат. 1949.
17. Хлопин В. и Никитин Б. Z. phys. Chemie, 1929, B. A 145 S. 137.
18. Вгипі А., Levi H. Atti Rom. Ac. Lincei, 1924, № 33, p. 377.
19. Вгипі А., Ferragagі B. Atti Rom. Ac. Lincei, 1925, № 2, p. 457.
20. Clouse G. Z. f. Krist., 1930, B 76, S. 285.
21. Fyfe W. S. Isomorphism and bond type. The Amer. Mineral, 1951, B 36, № 7/8, S. 538.
22. Goldschmidt W. M., Hauptmann T. Götting. Nachr, 1932, № 53.
23. Goossner H., Strunz H. Z. f. Krist., 1932, B 83, S. 415.
24. Johnsen A. Die anomalen Mischkristalle N. J. Miner., 1903, Bd. II, S. 93—138.
25. Seifert H. Die anomalen Mischkristalle. Fortschrifte Min., Krist., Petr., 1935—1937, № 19, S. 103—182; № 20, S. 324—456, № 22, S. 185—488.

Ленинградский горный институт
Кристаллография, вып. 5, 1956 г.

И. И. ШАФРАНОВСКИЙ

КРИСТАЛЛЫ И МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩАЯ СРЕДА

Кажущаяся косность, неподвижность, «статичность» природного каменного материала, долгое время служившего главным объектом исследования кристаллографов, не могла не наложить отпечатка на формирование самой науки о кристаллах. Знаменитая фраза Ф. Энгельса о том, что для естествоиспытателей XVIII в. мир «... был чем-то окостенелым, неизменным, а для большинства созданным сразу» [1], целиком приложима и к кристаллографам, с той только разницей, что такое состояние кристаллографии перешло за рамки XVIII в. и продолжалось чуть ли не до конца XIX в. Это положение усугублялось тем, что в старой кристаллографии, наряду с прогрессивным направлением, связанным с развитием горного дела и практической минералогией, имела место и мертвящая официальная линия, тормозившая научное развитие. Пытаясь оградиться от изменчивости и текучести всего в мире, реакционные ученые стремились опереться на якобы «неизыблемое», «неизменное», «от века созданное» каменное царство.

Наперекор этому направлению, в кристаллографии развивалось передовое течение, связанное с горным делом и полевой практикой. Здесь форма кристаллов руд и минералов привлекалась в качестве важного признака, позволяющего определить самый минерал. Бросавшаяся в глаза изменчивость формы в зависимости от типа месторождения наталкивала на мысль об изменяемости самих камней, об их зависимости от порождающей и окружающей их среды.

Ярким выразителем этого прогрессивного направления уже в XVIII в. был М. В. Ломоносов, призывающий идти работать в поле и на месте изучать кристаллы минералов и горячо протестовавший против царившего в то время мнения «... будто не токмо горы, долы и воды, но и разные роды минералов произошли вместе со всем светом, и потому ненадобно исследовать причин, для чего они внутренними свойствами и положением мест разнятся...» [2].

К сожалению, замечательные ломоносовские высказывания не привлекли в свое время достаточного внимания. К середине прошлого века официальная наука о кристаллах в основном выро-

дилась в схоластическое учение о формах кристаллических многогранников, рассматривавшихся оторванно и от природы и от их физико-химических свойств. Особенно характерно в этом отношении направление формальной школы XIX в. (Вейс, Науман), отвергавшей теорию атомистического строения вещества и исходившей лишь из внешней формы кристаллов, без учета их истинной симметрии.

При таком подходе кристаллические формы оказывались оторванными и от внутреннего строения кристаллов и от породившей и питавшей их окружающей среды. Регистрация фактов без попыток понять их сущность, изучение деталей без всякой руководящей идеи, нахождение как бы на ощупь случайных закономерностей — вот то, что составляло сущность формальной кристаллографической школы прошлого столетия.

Живительную струю в науку о кристаллах вообще, а в частности и в область минералогической кристаллографии, внесло творчество Е. С. Федорова (1853—1919), объявившего решительную борьбу со старыми схоластическими направлениями и создавшего новую федоровскую кристаллографию — основу современной науки о кристаллах.

Свое учение о кристаллах Е. С. Федоров целиком базировал на понятии кристаллической структуры. При этом Е. С. Федоров твердо стоял на платформе атомистической теории, хотя именно в то время широким распространением пользовались идеалистические идеи В. Оствальда и других ученых, отрицавших реальное существование самих атомов. Как известно, резкую отповедь таким ученым дал В. И. Ленин в своем гениальном труде «Материализм и эмпириокритицизм».

Е. С. Федоров не только выступил поборником атомистической теории, но и дал свой замечательный вывод: 230 пространственных групп — 230 геометрических законов, по которым только и могут располагаться элементарные частицы (атомы, молекулы) внутри кристаллов.

Внешние формы кристаллов привлекались им на помощь для определения схематического типа структуры (типа трансляционной решетки). На огромном фактическом материале Е. С. Федоров подтвердил справедливость закона Браве, согласно которому наиболее важные в отношении размеров и частоты встречаемости грани кристаллов соответствуют плотнейшим плоским сеткам решетки¹. Тем самым Е. С. Федоров раз и навсегда связал вопрос о внешних формах кристаллов с проблемой внутреннего кристаллического строения. При этом он особенно подчеркивал преобладающее влияние внутреннего строения (по сравнению с

¹ Напомним, что до открытия дифракции рентгеновских лучей в кристаллах в 1912 г. никаких «ходов внутрь структуры», помимо внешних форм и спайности кристаллов, не было.

другими факторами) на формирование кристаллов. Такой подход находит свое частичное оправдание в известном законе об единстве формы и содержания при ведущей роли содержания.

Действительно, на материале, относящемся к кристаллографии, можно показать немало примеров, когда кристаллические тела, образовавшиеся в совершенно различных условиях, характеризуются одинаковыми типами внешнего ограничения. Иллюстрацией этого могут служить искусственные и природные кристаллы корунда (рубина). Оказывается, что комбинация наиболее ярко выраженных мельчайших гранок на булях искусственного корунда — {001}, {1120}, {2243}, {1011}, — в точности соответствует серии важнейших форм корунда, выведенной для природных кристаллов статистическим путем в порядке частоты их встречаемости. Световые картины, наблюдающиеся для таких булей на гониометре, очень близки к световым картинам для природных боченковидных кристаллов корунда [3].

На этом примере ясно видно, как влияние структуры корунда затушевывает влияние внешних условий, резко отличающихся при процессах образования природного и искусственного корунда.

Итак, Е. С. Федоров решительно покончил с устаревшим направлением в науке о кристаллах, рассматривавшим кристаллические формы в отрыве от их внутреннего строения, т. е. кристаллической структуры.

Однако нельзя забывать, что форма кристаллов обусловливается не только внутренним строением, но и воздействием породившей и питавшей их среды. Стремясь определить по внешней форме внутреннее строение кристаллов, ученые пытались отделиться от всего внешнего, случайного по их понятиям, и выдвигали на первый план все то, что было якобы обусловлено только внутренним строением. На этом основании выводились идеальные типы кристаллов, теоретические последовательности их граней и т. п. Такие схемы и до сих пор широко используются в минералогической литературе (см., например, «Учебник минералогии» П. Ниггли [21]). Все, не укладывающееся в эти схемы, казалось досадным усложнением, случайной уродливостью, и в большинстве случаев вычеркивалось из науки. В настоящее время роль кристаллической формы как средства для определения структуры отошла на второй план. На первый план в глазах минералога выдвигается ее минерагенетическое значение. Изучение кристаллических форм и строение минерала проливает свет на условия его образования и на характер окружавшей его среды.

Современные кристаллографы, особенно кристаллографы с минералогическим уклоном, должны обратить большое внимание на все то, что в строении и формах кристаллов дает понятие о пройденных ими этапах развития, о характере и воздействии их

окружавшей среды. С этой точки зрения и следует всемерно развивать современную кристалломорфологию минералов.

Само собой разумеется, что нынешняя кристаллография не может ограничиваться лишь описанием кристаллических форм. «Исследовать законы и причины форм», — этот тезис, высказанный в свое время К. А. Тимирязевым по отношению к биологическим объектам, всецело приложим и к формам кристаллов [4].

В отличие от исследователей, расценивших описание внешних форм, как самоцель, современная наука должна рассматривать кристаллические формы во взаимосвязи со всей историей минералов как физико-химических и геологических объектов.

При таком подходе на первый план, разумеется, выступает роль среды, породившей, питавшей и разрушающей кристаллы минералов. Само вещество кристалла всецело зависит от породившей его среды. О том, что кристаллы минералов образуются лишь при каких-то определенных, благоприятных для их образования состояниях материнской среды, свидетельствует известный факт существования так называемых типоморфных минералов — минералов, типичных лишь для определенных условий образования.

Не касаясь известных относящихся сюда примеров из минералогии (алмаза, образующегося при огромных давлениях, и пр.), напомним парадоксальный случай минерала, до сих пор найденного в природе только в одном месторождении, затем утерянного. Речь идет о еремеевите, носящем имя знаменитого русского минералога П. В. Еремеева (1830—1899). Сейчас имеется лишь несколько интереснейших кристаллов этой минералогической редкости, носящих на себе резко выраженные следы частичного растворения. Очевидно, концентрация бора, требующаяся для его кристаллизации, достигается лишь при исключительно редких условиях [5].

Таким образом, для образования определенных кристаллов необходимы определенные физико-химические условия в окружающей среде и прежде всего определенная концентрация соответствующих компонентов.

Необходимо остановиться на вопросе о механизме возникновения кристаллических зародышей.

«Вопрос о зарождении кристаллов, о начальной стадии образования кристаллических зародышей уже давно занимал ученых и занимает в настоящее время. Однако он остается окончательно не решенным до сих пор», — пишет В. Д. Кузнецов [6].

Эксперименты показывают, что образованию зародыша благоприятствует существование в качестве затравки какого-либо твердого тела, хотя бы и очень малого. Такими затравками могут быть: 1) частицы кристаллизующегося вещества; 2) кристаллические частицы других веществ, образующих с кристаллами дан-

ного вещества закономерные сростки, и 3) частицы веществ, адсорбирующих данное вещество [7].

Установлено, что на поверхности минералов кристаллизация начинается при значительно меньших пересыпаниях, чем внутри раствора. При этом действие различных минералов и даже различных граней одного и того же минерала не одинаково. Особенность активными в этом отношении являются углы и ребра кристаллов¹.

Активизирующее действие прежде образованных минералов на кристаллизацию из раствора тем сильнее, чем больше сходства в их кристаллических структурах.

Итак, наличие в материнской среде твердых кристаллических образований — стенок породы, ранее образовавшихся кристаллов — явно способствует возникновению новых зародышей. Сходство структурных узоров в уже готовых кристаллах и вновь образующихся веществах, влияет на зарождение, ориентировку и рост последних. При этом важную роль играют законы параллельных и двойниковых сростков в случае однородных минералов, и законы эпитаксии в случае разнородных минеральных тел.

Реальная природная среда, порождающая и питающая кристаллы минералов, является, как правило, сложной, неоднородной, анизотропной.

Нельзя не учитывать подвижности и текучести жидких и газообразных частей этой среды. Все это чрезвычайно усложняет расшифровку процессов формирования природных кристаллов. Нередко на помощь здесь приходят характерные отклонения кристаллических форм от знакомых нам по студенческим занятиям идеализированных моделей кристаллов.

Природные формы, считавшиеся прежде лишь досадными отклонениями от законов симметрии и уродливостями минеральных образований, служат нередко надежными указателями особенностей породивших их процессов. Напомним, в этом отношении известные работы Г. Г. Леммлейна, Д. П. Григорьева, А. Е. Каракина, В. А. Мокиевского, показывающие связь неравномерного развития кристаллографически одинаковых граней кристаллов с концентрационными потоками, гравитацией, течением раствора и т. п. [8—11].

Изучение этих работ показывает важность учета не только идеальной симметрии, присущей структуре самого кристалла, но и симметрии питавшей его среды. Видимая наружная симметрия реального кристалла является результатом суммарного действия

¹ Многочисленные иллюстрации к этому положению можно найти в любом минералогическом собрании. В Горном музее при Ленинградском горном институте, например, имеется прекрасный образец крупного кубического кристалла — флюорита, ребра которого густо покрыты темным слоем сидерита, образующим как бы темную рамку на кристалле.

и первой и второй. При этом сохраняются лишь совпадающие элементы симметрии кристалла и среды [12—14].

В качестве поясняющего примера напомним, что октаэдрический кристалл квасцов, октаэдрическая грань которого совпадает с дном кристаллизатора, с течением времени приобретает видимую симметрию G_33P , тогда как идеальная его симметрия $C3G_4G_3G_6G_29P$ (вернее $C3G_24G_33P$). Как видно, из всех элементов симметрии квасцов сохранилась лишь тройная ось, совпадаю-

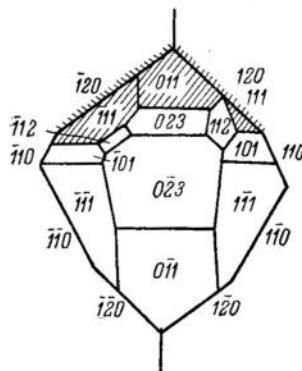


Рис. 1. Искаженный облик природного кристалла топаза с видимой симметрией P [14]

мая его симметрия, казалось бы, должна отвечать планальному виду симметрии ромбической сингонии G_{2P} . Однако рисунок показывает, что верхние и нижние грани ромбической дипирамиды (каждой пирамиды) и ромбических призм (каждых диз-дров) неодинаковы. Грани, обращенные вверх, развиты слабее, тогда как нижние грани развиты больше, что объясняется вертикальным движением маточного раствора. Симметрия такой движущейся жидкости не может иметь горизонтальных плоскостей симметрии, поэтому исчезла и соответственная плоскость симметрии на кристалле. Вместе с тем, для движущейся вертикально жидкости и вертикальных же стенок породы можно установить общие плоскости симметрии, перпендикулярные стенке и направленные также вертикально. Совпадшая с одной из таких плоскостей плоскость симметрии топаза и является единственным сохранившимся элементом видимой симметрии топаза.

Влияние симметрии окружающей среды на симметрию самого кристалла хорошо выявляется также с помощью новейших методов изучения кристаллических поверхностей [15, 24] и исследования на разрезах кристаллов пирамид и зон роста [16—18].

Большой интерес представляют резкие отклонения самого облика кристаллов от их истинной симметрии, отмеченные для ряда минералов.

Облик кристалла предопределяется, как известно, в первую очередь геометрией его структуры. Так, например, кристаллы со слоистой структурой обычно развиваются в виде пластин (слюды, хлориты, минералы глин). Игольчатые кристаллы характерны для структур, где имеются хорошо выраженные одномерные связи — ряды, цепочки. Для кубических же кристаллов, не имеющих резко отличающихся слоев или направлений, свойственен изометрический тип кристаллов.

Наиболее важными гранями в смысле развития и частоты появления на кристаллах будут грани, наиболее густо покрытые элементарными частицами. Кроме того, надо учитывать и силы связей между ними. Следовательно, вид правильно развитого кристалла, образовавшегося при равномерном и всестороннем питании его граней, зависит от его идеальной симметрии. Однако в природе наблюдаются чрезвычайно резкие отклонения от этого правила. Иногда это сказывается и на общем облике кристаллов. Существуют минералы, дающие в одних условиях ясно выраженные многогранники, а в других — образующие волокнистые и пластинчатые разновидности. Так, например, куприт встречается обычно в виде изометрических кристаллов. Вместе с тем, существует его разновидность — халькотрихит, кристаллы которого имеют волосистый габитус, сильно вытянутый вдоль ребер куба. Калиевые квасцы кристаллизуются в лаборатории в виде прекрасно образованных октаэдров, а в природе образуют изогнутое и скрученные волокна.

Для слюды, помимо пластинчатых кристаллов, наблюдаются иногда и столбчатые образования. Истолкование таких резких отклонений от идеальной симметрии и структурных особенностей следует, очевидно, искать опять-таки в симметрии окружающей среды и в направляющем воздействии структурных узоров подстилающих кристаллов, а также в причинах физико-химического порядка (температура, давление, степень пересыщения раствора, вязкость раствора и пр.).

К характерным примерам зависимости кристаллического роста от окружающей среды, требующего своего истолкования, относятся скелетные и дендритные формы. В своих интересных опытах В. А. Мокиевский и С. Н. Семенюк показали, как скелетовидные кристаллы квасцов, выросших в вязком растворе, в обычном водном растворе переходили в обычные октаэдрические кристаллы и обратно [19]. Однако вопрос о том, является ли причиной образования скелетных форм сама вязкость раствора или прибавление к нему примеси, остается открытым.

5 Кристаллография

До сих пор были рассмотрены примеры воздействия среды на внешнюю форму кристаллов. Гораздо глубже вопрос о взаимосвязи окружающей среды и самой кристаллической структуры. Этот вопрос должен занять центральное место в современной минералогической кристаллографии.

Оказывается, что одна и та же структура ведет себя различно в разных средах. В связи с этим, резко должен быть изменен и подход к структуре кристаллов. Следует категорически отбросить принятное до сих пор рассмотрение структуры как раз на всегда определенной, статической, неизменной геометрической системы.

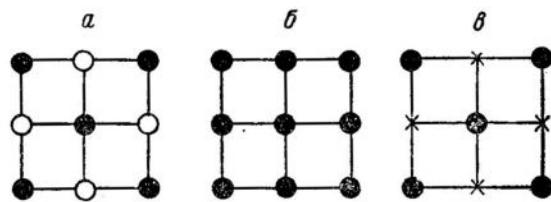


Рис. 2. Динамика сетки (100) для структуры NaCl в химически различных средах

Такой недиалектический подход должен быть окончательно исключен из науки. По сути дела, он был допустим лишь до появления рентгеноанализа кристаллических структур. В то время, согласно взглядам некоторых ученых, в узлах кристаллических решеток помещались однородные молекулы. Эти представления были опровергнуты первыми же расшифровками реальных кристаллических структур, показавшими, что узлы решеток, слагающих структуру, заняты в подавляющем большинстве случаев не молекулами, а отдельными атомами или ионами, обычно принадлежащими разным элементам. Именно этим и объясняется то, что одна и та же структура ведет себя по-различному, в зависимости от физико-химических условий среды.

Так, например, структура NaCl в нейтральной среде представляет как бы аналогию простой кубической решетки. Атомы Na и Cl становятся как бы однозначными. На модели структуры NaCl ионы Na и Cl можно окрасить одним цветом (рис. 2, б).

В простой кубической решетке наиболее плотными сетками являются грани куба. Поэтому на кристаллах с такой структурой на первом месте стоят грани {100}. Этому случаю и отвечают кристаллы NaCl, выпавшие из нейтральной среды и имеющие в большинстве случаев форму кубов.

В среде, не являющейся нейтральной (рис. 2, в), преимущественное значение приобретают ионы лишь одного сорта (или Na, или Cl). При этом структура NaCl представляет как бы анало-

гию центроцентрированной кубической решетки (на модели структуры атомы, выкрашенные в один цвет, выдвигаются на первый план, а атомы другого цвета стушевываются).

Известно, что в центроцентрированной кубической решетке плотнейшими сетками являются октаэдрические грани. С этим связана октаэдрическая форма кристаллов поваренной соли, выкристаллизовавшихся не из нейтральных растворов. Такое двойственное поведение структуры NaCl приводит к появлению различных кристаллических форм, характерных для различных условий.

В литературе уже подробно разбиралось динамическое поведение структур сфалерита и корунда и порождаемые ими различные кристаллические габитусы, характерные для различных типов месторождений [20]. Динамика реальных кристаллических структур, обусловленная окружающей средой, неразрывно связана с физико-химическими изменениями, происходящими в этой среде.

Известно, например, что эффективные размеры атомов или ионов, слагающих структуру, колеблются в зависимости от повышения или понижения температуры и давления. Эти изменения приводят, в конце концов, к полным перестройкам структур и к переходам кристаллов в другие полиморфные модификации.

Химизм поведения кристаллических структур в природе усложняется явлениями изоморфизма, вызывающими замену одних частиц структуры другими. Отмеченная динамика структур усугубляется несовершенствами реальных кристаллов, которые, как известно, состоят из отдельных блоков (моноокристалльных областей), придающих всему кристаллу характер мозаики. Кроме того, внутри таких блоков имеются пустоты, связанные с тем, что не все точки правильной системы заняты атомами. Наличие подобных пустот вызывает своеобразную жизнь кристалла — явление диффузии и пр. [21]. Таким образом, динамический подход к структурам минералов является достаточно сложным и требует в настоящее время особого внимания.

Подчеркнутые выше моменты современной минералогической кристаллографии и развивающиеся ею новые приемы должны применяться к изучению отдельных конкретных минеральных видов.

До сих пор в стенах Горного института разрабатывались известные определители кристаллов и минералов, дававшие возможность по внешней и внутренней геометрии кристаллов выявлять их вещества («Царство кристаллов» Е. С. Федорова, «Определитель кристаллов» А. К. Болдырева, В. В. Доливо-Добровольского и др., «Рентгеновский определитель минералов» А. К. Болдырева, В. И. Михеева и др.).

Думается, что сейчас имеются все данные для создания генетического определителя, который позволит на основании струк-

турных и кристалломорфологических исследований решить вопрос о происхождении и развитии кристаллов того или иного минерала, а также о физико-химических свойствах породившей и питавшей их окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энгельс Ф. Диалектика природы. ОГИЗ, 1948, стр. 9.
2. Ломоносов М. В. О слоях земных. Соч., т. 5, изд. АН СССР, 1954, стр. 574—575.
3. Марочкин Н. Н. и Шафрановский И. И. Кристаллография булыжного искусственного корунда. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1953, ч. 82, № 1.
4. Тимирязев К. А. Сочинения, т. 5, изд. АН СССР, 1937—1940, стр. 137.
5. Шафрановский И. И., Михеев В. И., Мокиевский В. А. К вопросу о существовании эйхвальдита внутри еремеевита. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1952, ч. 81, № 1.
6. Кузнецов В. Д. Кристаллы и кристаллизация. Гос. издательство технико-теоретической литературы, 1953, стр. 11.
7. Григорьев Д. П. Что известно о зарождении минералов? Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1951, ч. 80, № 1.
8. Леммлейн Г. Г. Искажение облика кристаллов кварца, обусловленное их положением во время роста. ДАН СССР, 1941, т. 33, № 6.
9. Григорьев Д. П. О генезисе минералов. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1947, ч. 76, № 1.
10. Каракин А. Е. О связи качества кристаллов кварца с их внешним обликом. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1948, ч. 77, № 4.
11. Мокиевский В. А. К вопросу об исказении облика природных кристаллов. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1953, ч. 82, № 3.
12. Шубников А. В. Как растут кристаллы. Изд. АН СССР, 1935, стр. 166.
13. Шафрановский И. И. Внешняя симметрия реальных кристаллов и симметрия питающей среды. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1954, ч. 83, № 3.
14. Иогансен И. В. Искажение облика кристаллов топаза. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1949, ч. 78, № 4.
15. Леммлейн Г. Г. Сообщение о микрорельфе кристаллических граней. Вестник АН СССР, 1945, № 4, стр. 119.
16. Леммлейн Г. Г. Секториальное строение кристаллов. АН СССР, 1948.
17. Иванов С. Н. Изучение зон роста зерен пирита. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1950, ч. 79, № 2.
18. Никитич В. Д. Зональность и микрозональность в мусковите. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1952, ч. 81, № 2.
19. Мокиевский В. А. и Семенюк С. Н. Скелетный рост кристаллов в вязкой среде. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1952, ч. 81, № 2.
20. Михеев В. И. и Шафрановский И. И. О совпадении теоретических и генетических типов кристаллов цирковой обманки. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1948, ч. 77, № 4.
21. Белов Н. В. и Бокий Г. Б. Современное состояние кристаллохимии и ее ближайшие задачи. Первое совещание по кристаллохимии. Изд. АН СССР, 1954, стр. 30.
22. Niggli P. Lehrbuch der Mineralogie. 1924—1926, Bd. I, II.
23. Curie P. Sur la symétrie dans les phénomènes physiques. Oeuvres de P. Curie, 1908, p. 118—141.
24. Tolansky S. Proc. Royal Soc. 1945, № 184, p. 41.

Ленинградский горный институт
Кристаллография, вып. 5, 1956 г.

Г. Л. ВАЗБУЦКИЙ

СКУЛЬПТУРА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛОВ БЕРИЛЛА¹

ВСТУПЛЕНИЕ

Еще в прошлом столетии были известны поверхностные структуры роста на кристаллах разных минералов, в том числе и берилла: штриховка, ступенчатое строение граней и кристаллов в целом и выступы на гранях. Происхождение штриховки и ступенчатости граней уже тогда объясняли ростом кристаллов путем отложения слоев на гранях [29]. Было известно и о строении кристаллов из отдельных блоков — субиндивидов, сросшихся в параллельном положении [17], а также о сложном строении подобных блоков из субиндивидов нескольких порядков [11]. Тем не менее, эти структуры до сих пор изучены далеко не достаточно, хотя такое изучение имеет большое значение для выяснения механизма роста кристаллов.

Краткие описания структур роста берилла можно найти в работах Н. И. Кокшарова, А. Н. Карножицкого, П. В. Еремеева и др.

Интересные исследования штриховки на берилле имеются в работах А. Н. Карножицкого [14, 16], обнаружившего, что «...плоскости базиса у него (берилла) исштрихованы параллельно комбинационному ребру базиса с плоскостями основной пирамиды, причем штрихи эти изолируются в шести секторах». По зонарной окраске и другим оптическим свойствам выяснилось, что слои роста параллельны граням основной дипирамиды при отсутствии слоистости параллельно плоскости пинакоида. Из этого А. Н. Карножицкий сделал замечательное предположение, согласно которому штрихи в данном случае «...представляют собой выдающиеся выступы, или выходы, как бы слепо оканчивающиеся на поверхности базиса слоев, параллельных плоскостям пирамиды при отсутствии слоистости по базису». Он составил классификацию штриховок, выделив штриховки роста («поверхностные»), а среди них — штриховки на гранях с параллельными им слоями роста («синзональные») и штриховки на гранях, под которыми нет параллельных им слоев («гемизональные»). Су-

¹ Доложено на Федоровской научной сессии 1951 г.

ществование штриховок последнего типа А. Н. Карножицкий не считал доказанным. Судя по его эскизам, для штриховок разного типа были поставлены интересные вопросы о том, как писать штриховку. Многие из них не разрешены до сих пор, несмотря на современную технику микроскопического и других методов изучения.

Идея А. Н. Карножицкого о связи штриховок роста со слоями роста тем более заслуживает внимания, что в более поздней статье В. И. Вернадского образование комбинационной штриховки не связывается с явлением послойного нарастания кристаллических граней и даже не упоминается о существовании этого явления [3].

В одном из посмертных изданий научных материалов М. А. Толстопятова также приводится изображение наблюдавшегося на грани пинакоида берилла весьма нежного, но явственного узора, состоявшего из концентрических шестиугольников [23]. Шесть секторов узора местами разделялись радиальными линиями. Объяснения происхождения этого узора в материалах М. А. Толстопятова нет.

Кристаллы берилла со штриховкой и ступенчатым строением граней часто демонстрировал П. В. Еремеев на заседаниях Минералогического общества. На одном из кристаллов берилла он наблюдал ступенчатую плоскость пинакоида, «покрытого в трех направлениях осцилляторической¹ штриховатостью от комбинации с некоторой неопределенной гексагональной пирамидой первого рода. Кроме пинакоида, все грани были совершенно гладки и блестящи, а призмы матовы и с ромбическими углублениями» [7, стр. 26, 28, 29]. На кристаллах берилла часто наблюдалась вертикальная штриховка на гранях призм [10, стр. 58—60], или вместо нее — сложные полиэтические плоскости.

Кристаллы же берилла в виде сростков параллельных субиндивидов отмечал еще Н. И. Кокшаров. Он указывал, что этот минерал часто представлен агрегатами из множества индивидов, сросшихся в параллельном положении, «ограниченных поверхностями неровными, друзообразными, струйчатыми и т. п.» [17]. «Друзообразными» Н. И. Кокшаров называл сростки и грани берилла, имеющие вследствие параллельного срастания индивидов выступы, «остроконечия» на гранях призм и пинакоида, а также ступенчатый облик.

Подобные «друзообразные» кристаллы берилла демонстрировал и П. В. Еремеев. Он описал штуф берилла, представлявший собой сросток параллельных и местами неправильно соединившихся кристаллов, из которых многие «...в нижней части своей расчленяются и постепенно переходят в табличеобразные

¹ Понятие осцилляторической (т. е. колебательной) комбинации ввел для объяснения штриховки Науманн [3].

и тонкопластинчатые кристаллы бесцветного и сильно блестящего ростерита...» с габитусной гранью пинакоида. Часть табличек ростерита незаметно сливаются с главной массой обычного призматического берилла. «Образование обеих разностей берилла... было одновременным». На кристаллах берилла наблюдалось скорлуповатое сложение в направлении плоскостей нескольких форм [10]. При разбивании кристалла обнаруживалось множество субиндивидов. Параллельно пинакоиду имелись также тонкие пластинчатые пустоты, по которым кристаллы разламывались, и на обеих поверхностях разлома оказывались прерывающиеся, но вполне ровные и сильно блестящие плоскости, «так сказать, внутреннего базопинакоида». На двух кристаллах берилла, прозрачных и без недостатков внутри и снаружи, также без следов штриховки, можно было видеть, что «...каждый из кристаллов с одного конца сломан по естественной трещине в косвенно-поперечном направлении, причем поверхность такого излома почти сплошь покрыта на разных горизонтах мелкими, блестящими плоскостями базопинакоидов $OP(0001)$, которые принадлежат множеству субиндивидов, параллельно слившихся в направлении граней призмы $\infty P(10\bar{1}0)$ » [9, стр. 58, 59].

Эти наблюдения П. В. Еремеева доказывают, что строение из субиндивидов — явление не поверхностное и относится не только к строению грани, но и кристалла. Между тем позднее В. И. Вернадский придерживался противоположного взгляда [3].

На строение кристаллов берилла из субиндивидов нескольких порядков указаний в ранней литературе нет. Такие указания имеются для турмалина [11] и золота [8].

В более поздних и современных работах по бериллу поверхностным структурам роста почти не уделяется внимания. О некоторых деталях упоминает Н. Ю. Икорникова, которая при изучении кристаллов берилла наблюдала на гранях гексагональных призм штриховку в трех направлениях, а в одном случае вогнутость, обусловленную мельчайшими ступеньками роста [13].

Повидимому, представит интерес начатое Л. И. Гриффином изучение рельефа граней берилла интерферометрическим методом [31].

В литературе имеется много описаний разнообразных видов скульптурных образований, связанных с ростом, на гранях кристаллов разных минералов [24]. Мы ограничились материалами Н. И. Кокшарова, А. Н. Карножицкого и П. В. Еремеева, относящимися лишь к тем структурам роста, которые удалось обнаружить и изучить на немногих образцах берилла.

В настоящей работе изложены результаты изучения обнаруженного на берилле рельефа, замечательно похожего на отмечавшийся ранее.

По своему габитусу просмотренные и изученные кристаллы являются призматическими вытянутыми, с габитусными гранями призмы первого рода $a\{1010\}$ и рядовыми гранями пинакоида $c\{0001\}$ ¹, при почти полном отсутствии подчиненных граней. Однако выяснилось, что на некоторых участках кристаллов скульптура поверхности берилла состоит не только из указанных габитусных или рядовых граней, но и из многих мелких и микроскопически мелких призматических граней других символов, а также из дипирамидальных граней, составляющих в целом поверхностные структуры роста кристаллов.

При этих структурах грани настолько мелки, что в большинстве случаев не поддаются измерениям на гoniометре. Изучение структур и определение символов гранок приближенным методом производилось нами под микроскопом с помощью опак-иллюминатора и федоровского столика.

Автор полагает, что излагаемая методика может быть успешно применена для описания скульптуры поверхности кристаллов различных минералов и в том числе для решения практических вопросов относительно минералов, применяемых в промышленности: пьезокварца, рубина, алмаза и др. Методика эта может быть использована для разработки проблемы роста и растворения кристаллов, для диагностики минералов, выяснения их генетических типов и для приближенных гониометрических измерений микроскопически мелких плоскостей кристаллов.

Автор считает своим долгом поблагодарить профессоров О. М. Аншелеса, Д. П. Григорьева и И. И. Шафрановского за советы и тщательный просмотр рукописи, а также К. Ф. Невскую и В. С. Романовича — за помощь в микрозарисовках и фотографировании.

I. ОБЩИЕ ДАННЫЕ О РЕЛЬЕФЕ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ БЕРИЛЛА

Цель проведенной работы состояла в детальной расшифровке рельефа на кристаллах берилла со стороны граней пинакоида. Отдельные кристаллы или параллельные по оси Z сростки кристаллов увенчиваются с одного или обоих концов не простыми площадками пинакоида, а значительно более сложной поверхностью, элементы которой в одних случаях проявлены мало заметно, а в других — весьма отчетливо. Основными элементами рельефа являются выступы, ограниченные ступенчатыми площадками пинакоида и боковой призматической поверхностью, и впадины, расположенные вокруг выступов или на них. Часто пло-

¹ Здесь и далее принята кристаллографическая установка по Браве и буквенные обозначения граней по Гольдшмидту и «Определителю кристаллов» [6].

щадки не только имеют ступенчатое строение, но и состоят из отдельных блоков. Наблюдать довольно сложный рельеф можно нередко в лупу, но для изучения понадобились детальные зарисовки под микроскопом в отраженном свете.

Одна из зарисовок (рис. 1, а), позволившая изучить многие интересные морфологические особенности, относится к верхнему ограничению одиночного кристалла берилла, имеющего в длину 24 мм при довольно правильном гексагональном поперечном сечении шириной 9—11 мм. Кристалл этот ограничен шестью скульптурными гранями гексагональной призмы первого рода $a\{1010\}$ и довольно сложной ступенчатой поверхностью со стороны одной грани пинакоида. Другой конец кристалла обломан. Кристалл бесцветен и прозрачен, но внутри имеются замутненные участки, мелкие полости с газово-жидкими включениями и весьма характерные площадки, похожие на трещинки, большей частью параллельные плоскости пинакоида и не доходящие до наружной поверхности кристалла. Объектом изучения явилась указанная ступенчатая поверхность этого кристалла.

Значительную часть зарисовки занимает выступ, ограниченный сверху площадкой ступенчатого пинакоида и сбоку призматической поверхностью, отделяющей выступ от окружающей впадины, дно которой на 1—4 мм ниже уровня площадки. В разных частях впадины имеется множество более мелких столбчатых выступов, увенчанных сверху ступенчатыми или простыми площадками пинакоида. Размеры этих выступов в поперечном сечении весьма различны, вплоть до еле видимых под микроскопом. Различна и высота выступов, причем обычно они ниже наиболее крупного выступа и последовательно понижаются в стороны от него. На севере¹ и северо-западе, отчасти и на востоке, имеются целые гряды мелких выступов (от нескольких десятков до 250 в каждой гряде), вытянутые грубо параллельно близлежащему ребру между гранями c и a кристалла. Выступы, входящие в состав каждой такой гряды, приблизительно равной высоты, а для гряд в целом наблюдается ступенчатое понижение в направлении периферии. Между грядами находятся умеренно глубокие впадины (рис. 1, б). Самыми пониженными (до 4 мм) по отношению к наиболее крупной площадке пинакоида являются верхние ребра граней призмы кристалла. Почти нет выступов, вплотную доходящих боковыми призматическими гранями до наружных призматических ограничений кристалла.

Судя по зонарным (концентричным) рисункам на верхних площадках выступов, всем им присуща параллельная ориентировка, унаследованная, очевидно, от общего кристаллического

¹ Будем называть правую, левую и т. д. части рисунков соответственно восточной, западной и т. д. частями.

основания. Иногда наблюдаются небольшие отклонения от строгой параллельности: поворот или наклон к оси Z.

Площадки пинакоида — гладкие блестящие грани — в отраженном свете кажутся серыми и притом довольно светлыми (за отсутствием других цветов в поле зрения, кроме черного). Рельеф

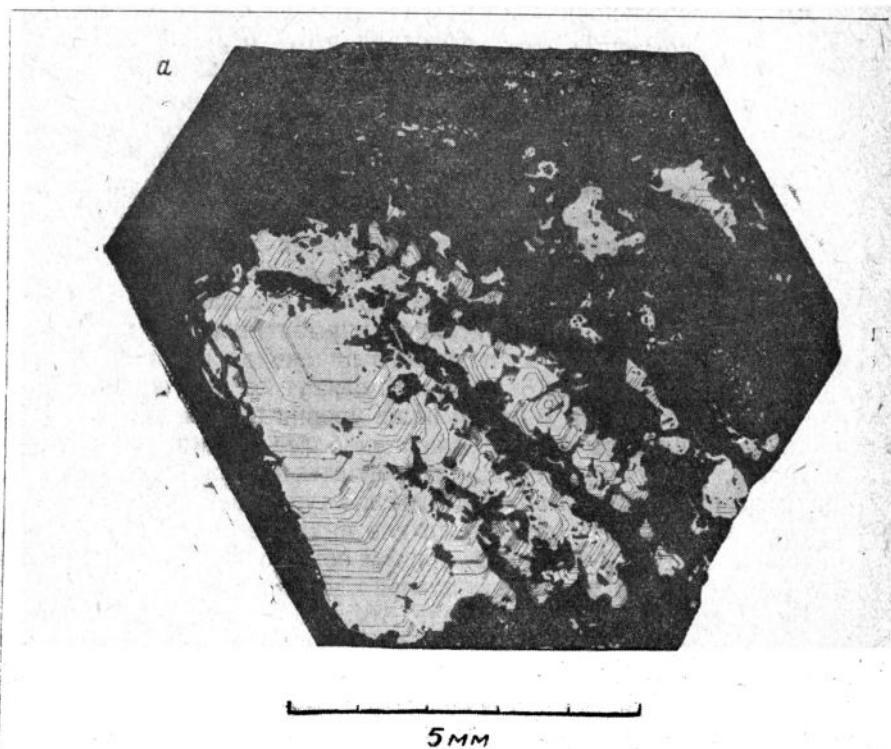
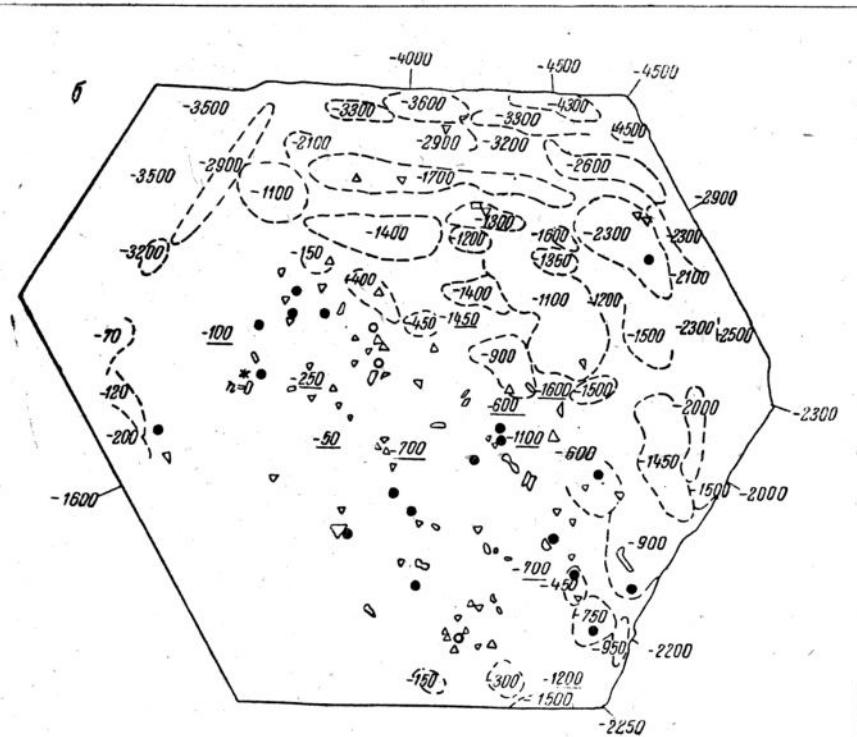


Рис. 1. Сильно расчлененная

а — скульптура грани под микроскопом в отраженном свете; вы-
соты; мелкие треугольные и другие контуры — грани гексаго-
нентры кристаллизации систем слоев гостя: цифры не подчеркнуты
впадин (*) по отношению к наивысшей точке ($h = 0$).

плоскостей пинакоида выражается главным образом ступенчатостью, создаваемой тонкими зонарными линиями (полосами), а также наличием мелких впадинок (рис. 2). Зонарные линии и впадины в отраженном свете черного цвета. Эти линии представляют собой микроскопически мелкие и мельчайшие уступы. На боковой же поверхности выступов в косом свете можно заметить

(рис. 3), что в ряде мест призматические грани притупляются микроскопически мелкими гранями гексагональных (иногда также дигексагональных) дипирамид в виде треугольных, трапециoidalных или многоугольных площадочек. На рис. 1, б показано расположение свыше 75 косых граней (не считая очень мелких).



грань пинакоида берилла:

ступы (белые), впадины (черные) и слоевые линии. Зарисовка Штриховые линии — границы гряд высступов приблизительно одной нальных дипирамид; жирные точки — достоверно устанавливаемые — отметки высступов и ребер кристалла, подчеркнутые — глубины отмечено звездочкой

Имеющиеся данные, в русской литературе главным образом О. М. Аншелеса [1, 2], относящиеся к изучению ступенчатой структуры граней естественных минералов и послойного ступенчатого роста граней искусственных минералов, позволяют считать, что и для берилла зонарные узоры и ступенчатая структура на гранях пинакоида являются отражением послойного ступен-

чатора роста этого минерала. Каждой зонарной линии соответствует тонкий слой роста, микроскопически различимый или, во всяком случае, поддающийся оптической диагностике. Часть слоя, видимая на поверхности кристалла, образует ступеньку, имеющую два существенных ограничения: 1) плоскость, параллельную тангенциальному росту слоя вдоль грани, которую в дальнейшем условимся называть террасой, и 2) боковую поверхность, в постепенном перемещении которой и заключалось разрастание слоя по грани; назовем эту поверхность уступом, торцовой поверхностью, или просто торцом слоя. Зонарные линии будем на-

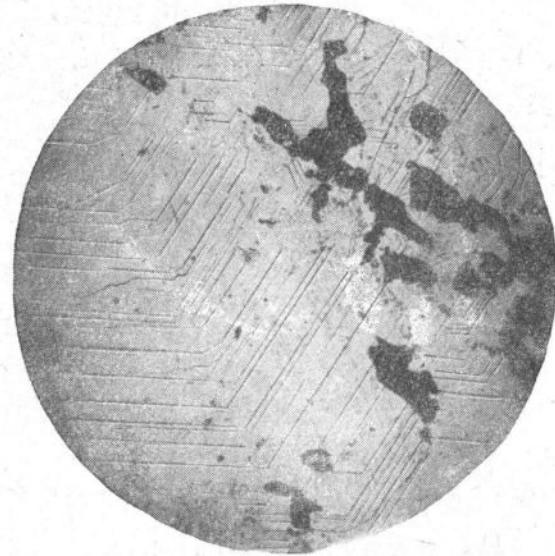


Рис. 2. Часть площадки ступенчатого пинакоида, состоящая из террас (серые участки), уступов (концентрические черные линии) и впадин (черные поля). Вследствие небольшого дефокусирования (тубус микроскопа приподнят) рядом с черными линиями со стороны их выпуклости заметны светлые полоски. Микрофотография в отраженном свете. $\times 31$

зывают, как это принято в литературе, также линиями слоев, или слоевыми линиями [25].

Было интересно выяснить, что представляют собой уступы зонарных узоров и микроскопические гранки, т. е. имеют ли эти поверхности простые индексы или являются вицинальными, или имеют сложные индексы.

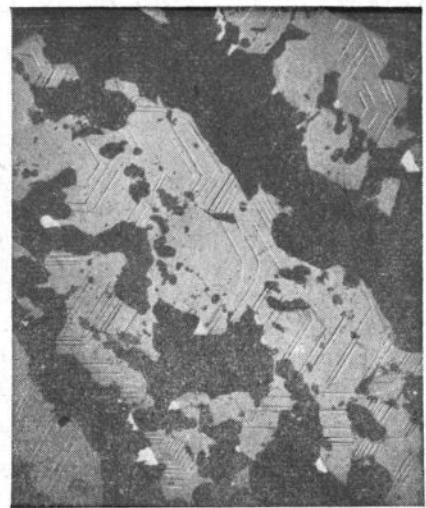
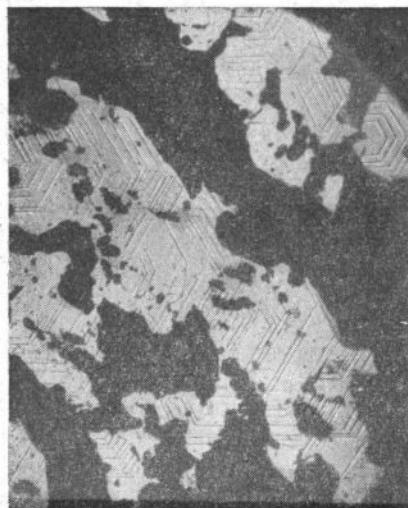


Рис. 3. Площадка ступенчатого пинакоида (серые участки с черными концентрическими линиями), сильно расчлененная впадинами:
а — в отраженном свете; б — в отраженном свете с добавлением направленного косого света. Освещены мелкие грани гексагональной дипирамиды (белые площадочки), имеющие ориентировку {1101}. $\times 31$

II. ПРИЕМЫ ПРИБЛИЖЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОСКОПИЧЕСКИ МЕЛКИХ ГРАНЕЙ

Зонарные узоры и прочие элементы рельефа на гранях довольно хорошо заметны под микроскопом в отраженном свете. Когда грань пинакоида нормальна к падающим на нее лучам отраженного света, признаком ее ступенчатости является прежде всего то, что при поднятии тубуса микроскопа рядом с каждой черной зонарной линией появляется светлая линия, передвигающаяся в сторону выпуклости гексагонального контура зонарных линий. При опускании же тубуса светлая линия передвигается в сторону вогнутости контура. Таким образом, отчетливо устанавливается, что каждая объемлющая площадка пинакоида по одну сторону некоторой ломаной линии зонарного узора ниже объемлемой площадки по другую сторону. Световой эффект на грани ступенчатого пинакоида берилла можно наблюдать и просто под лупой при соответствующем направлении освещения. Этим световым эффектом, похожим на эффект линии Бекке, пользуются в минерографии для сопоставления относительной твердости соприкасающихся минералов, основываясь, разумеется, на разной высоте минералов различной твердости в полиро-

ванном шлифе и на наличии в стыке таких минералов косой поверхности. Таким образом, мы имеем дело со ступенчатым строением, при котором террасами являются площадки пинакоида, а уступами — гранки, во много раз более узкие, чем террасы.

Для измерения угла с плоскостью пинакоида этих гранок, а также несколько более крупных косых гранок у краев выступов понадобилось наклонять кристалл или мелкий обломочек с рельефной площадкой, для чего был применен федоровский столик. К микроскопу прикреплялись и опак-иллюминатор, и федоровский столик (без стеклянных сегментов и стеклянного диска). На место стеклянного диска помещалось несложное устройство (рис. 4) из картона или жести. Оно состояло из двух скрепленных между собой дисков *A* и *B* того же диаметра, что и диаметр стеклянного диска, и третьего подвижного диска *C*. Нижний из этих двух дисков *A* сплошной, верхний *B* с круговым вырезом посередине. Третий, предметный диск *C*, с диаметром большим, чем вырез в верхнем диске *B*, помещался между дисками *A* и *B*. В диске *C* накалывались мелкие дырочки. Вставляя в них острое иглы, можно передвигать диск на расстояние, достаточное для совмещения с центром поля зрения любой точки кристаллика или кристаллического обломочка *E* (площадью несколько миллиметров), помещаемого на предметный диск. Обломочек монтируется не на пластелин или воск, а на кусочек мыла *D* средней консистенции. При этом в случае загрязнения мылом рельефной площадки обломка препарата легко отмывается простым погружением обломка в воду. Обломок монтируется с помощью пинцета в центральной части диска *C* рельефной площадкой, подлежащей изучению, вверху. Необходимая высота препарата достигается вывинчиванием металлической оправы, в которую вставляются диски *A* и *B* взамен стеклянного диска столика. Таким образом, препарат можно центрировать во всех трех измерениях. Диски *A* и *B* скреплены проволочками *F*, что позволяет без труда и быстро раскреплять и снова скреплять их для замены одного предметного диска *C* другим с новым кристаллическим обломком на нем. Поэтому все изучав-

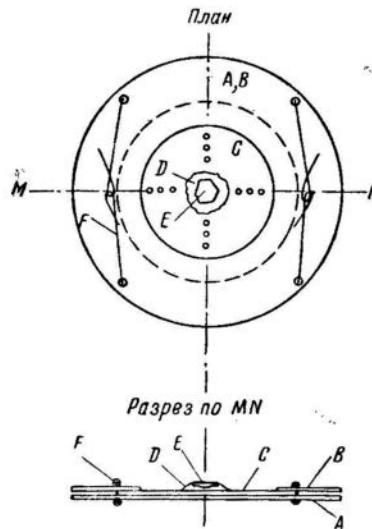


Рис. 4. Приспособление к федоровскому столику для изучения скульптуры граней кристаллов

рат легко отмывается простым погружением обломка в воду. Обломок монтируется с помощью пинцета в центральной части диска *C* рельефной площадкой, подлежащей изучению, вверху. Необходимая высота препарата достигается вывинчиванием металлической оправы, в которую вставляются диски *A* и *B* взамен стеклянного диска столика. Таким образом, препарат можно центрировать во всех трех измерениях. Диски *A* и *B* скреплены проволочками *F*, что позволяет без труда и быстро раскреплять и снова скреплять их для замены одного предметного диска *C* другим с новым кристаллическим обломком на нем. Поэтому все изучав-

емые препараты подобно шлифам можно сохранять в монтированном на дисках состоянии. Небольшое переустройство (центральные отверстия во всех трех дисках) позволило изучить на федоровском столике не только мелкие обломки кристаллов, но и всю площадку описанного выше кристалла (см. рис. 1). Определения производились при средних увеличениях микроскопа.

Приемы определения на препарате угла между гранями кристалла (вернее, между нормалями к граням) сводились к следующему. Вращением вокруг оси *N* федоровского столика ребро между измеряемыми гранями или одна из полосок зонарного контура приводились в положение, параллельное оси *I*, а наклоном около осей *H* и *I* (при $H \perp I$) одна из граней, обычно легко узнаваемая грань *c*, приводилась в положение наибольшей освещенности. Но это положение недостаточно чувствительное и потому не вполне определенное так как грань продолжает оставаться достаточно светлой на интервале $10-15^\circ$ наклона столика около оси *I*. Чувствительными являются два положения погасания грани при наклоне около оси *I* в ту или другую сторону или, что почти то же, два положения начала просветления грани. По лимбу оси *I* берем отсчет для каких-либо соответственных чувствительных положений грани *c* и смежной с ней. Разность отсчетов дает угол между нормалями к граням, т. е. полярное расстояние грани, смежной с гранью *c*. Углы между гранями по двум отсчетам определяются таким путем с точностью до $\pm 1/2^\circ$. Степень точности можно увеличить измерениями при всех четырех чувствительных положениях граней.

Описанный метод отличается от предложенного в свое время А. Н. Заварицким [12] главным образом тем, что измерения производятся не по сигналам от удаленного источника света и без применения линзы Бертрана, а в отраженном свете с помощью опак-иллюминатора. Кроме того, применялось другое приспособление для укрепления и центрирования кристаллика. Каждый из двух вариантов метода при почти одинаковой степени точности имеет свои достоинства и недостатки.

С помощью опак-иллюминатора и федоровского столика удалось выяснить, что треугольные и многоугольные грани, притупляющие ребра выступов, чаще всего представляют собой грани гексагональной дипирамиды первого рода $p\{1011\}$ и относительно редко второго рода $s\{1121\}$. Не менее эффективно узнаются и тонкие полоски — грани зонарных узоров, когда они имеют тот же символ. Все же надежнее иметь в поле зрения одновременно и косые краевые грани, и группу параллельных полосок из зонарного узора. Все они в этом случае одновременно просветляются и погасают, что указывает на весьма совершенную идентичность их символов, в том числе и для таких полосок, ширина которых едва достигает $0,001-0,002$ мм (рис. 5). Измеренные полярные

расстояния составляют 30 и 45° с точностью до $\pm 1/2^\circ$, что ближе всего подходит соответственно к граням p и s ($\rho_{111} = 29^\circ 57'$; $\rho_{1121} = 44^\circ 56'$). Для берилла неизвестны грани, полярные расстояния которых приближались бы к полярным расстояниям граней p и s ближе, чем соответственно на 11 и 2°. С другой стороны, мало вероятно, чтобы целая совокупность плоскостей в виде отчетливых гранок и многих тонких полосок представляла собой комплекс каких-либо вицинальных гранок, близко параллельных граням p или s , с совершенно одинаковыми для всех их сложными индексами. Эти выводы, а также и то, что даже

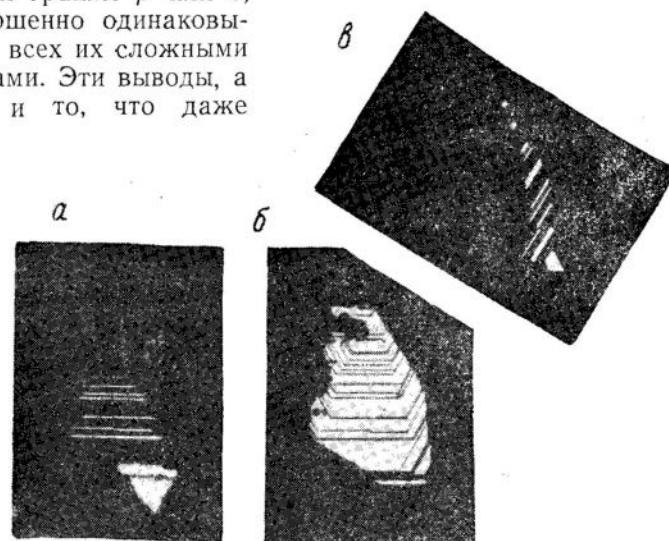


Рис. 5. Мелкий выступ, ограниченный гранями призм, гексагональных дипирамид $\{10\bar{1}\}$ и ступенчатым пинакоидом m . Все уступы ступенек состоят только из тонких гранок $\{10\bar{1}\}$. *a* — освещена площадка пинакоида (белая), расположенная перпендикулярно оптической оси микроскопа. Чёрные линии и полоски — системы гранок $\{10\bar{1}\}$ слева, $\{10\bar{1}\}$ — к наблюдателю и $\{1\bar{1}\bar{1}\}$ — справа; *b* — при наклоне выступа из положения *a* около оси I федоровского столика из 30° осветилась ближняя половина системы гранок $\{1\bar{1}\bar{1}\}$; дальняя половина гранок той же системы не находится в фокусе и потому на фотографии не видна;

b — при повороте выступа из положения *a* на 60° около оси N и наклоне около оси I на 30° осветилась система гранок $\{1\bar{1}\bar{1}\}$. Микрофотография в отраженном свете на федоровском столике. $\times 60$

тонкие полоски являются хорошо образованными плоскостями, делают весьма вероятным определение этих граней, как граней p и s , несмотря на приближенное измерение их полярных расстояний.

Сложнее в тех случаях, когда уступы зонарного узора состоятся призматическими гранками, так как после приведе-

ния их в положение, нормальное к оси микроскопа, часто не удается приблизить к ним объектив настолько, чтобы они оказались в фокусе. На помощь приходит использование некоторых оптических явлений.

Если лучи света падают строго нормально на плоскость c , то в отличие от косого уступа (рис. 6, *a*) призматический уступ вообще не должен быть виден ни освещенным, ни темным. Уже

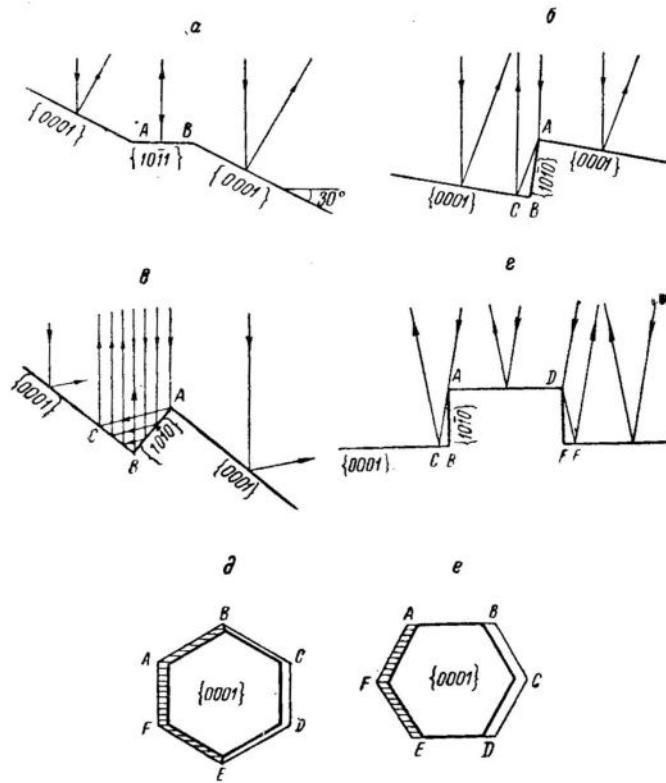


Рис. 6. Некоторые оптические явления при наблюдении ступенчатых граней в отраженном свете

при весьма небольшом наклоне плоскости c (рис. 6, *b*) лучи упадут на призматическую грань AB и, отразившись от нее и затем от участка BC площадки c , попадут в глаз наблюдателя. Другие лучи пойдут в обратном направлении, т. е. упадут на участок BC и отразятся от этого участка и затем от грани AB . Таким образом, наблюдатель увидит одновременно два отражения: грани призмы на плоскости пинакоида и части плоскости пинакоида на грани призмы. Другими словами, при наклоне грани c

немедленно начнет появляться светлая полоса ABC , которая, по мере увеличения угла наклона, будет становиться более широкой (рис. 6, в). В этом отличие от эффекта косых граней при наклоне ступенчатого пинакоида. Нетрудно убедиться, что при этом интенсивность освещения данной полоски все время остается меньшей, чем интенсивность освещения грани c или косых гранок r или s в положении, нормальном к падающим лучам (например, на рис. 6, а), причем с увеличением угла наклона интенсивность освещения падает (BC на рис. 6, в по сравнению с рис. 6, б).

Второе осложнение оказывается при не вполне «вертикальном» направлении падающих лучей. Оно заключается (рис. 6, г) в появлении теневого участка BC от призматического выступа AB на площадке c , ориентированной нормально к оптической оси микроскопа. При этом с противоположной стороны DE призматического столбика, на участке EF пинакоида c , появляется световая полоска, рассмотренная выше (рис. 6, б, в). По степени интенсивности освещения она отличается от всей остальной части пинакоидальных террас — как верхней AD , так и нижней. При шестиугольном контуре верхней террасы наблюдатель увидит вокруг нее кайму — наполовину теневую и наполовину из светлой полоски (рис. 6, д или 6, е).

При высоте призматических уступов в сотые и десятые доли миллиметра хорошо видны тени уступов на площадках пинакоида, а при наклоне препарата — прекрасные взаимные отражения призм и пинакоида. Более тонкие призматические уступы не дают таких ясных световых эффектов, как пинакоид и косые грани. Но все же, хотя и несколько косвенным путем, можно определять и тонкие призматические уступы по изложенным выше световым эффектам. Призматические весьма тонкие полоски узнаются по тому, что при максимальной освещенности плоскости c каждый отдельный шестисторонник из этих полосок составлен из линий неравной толщины, причем одна половина линий контура темная, а другая — светлая. Как только при наклоне около оси I федоровского столика погаснет плоскость c , так сразу же становится заметной светлая полоска (или серия таких полосок), менее яркая, чем грань c , и при дальнейшем наклоне часто перестающая быть различимой вследствие довольно резкого уменьшения интенсивности освещения. Во всяком случае, светлая полоска часто исчезает еще до того, как угол наклона достигает 30° , при этом освещаются имеющиеся в поле зрения грани r . Является ли призматическая гранка гексагональной призмой первого или второго рода или, наконец, дигексагональной призмой, можно узнать по тому, как ориентировано ребро гранки с пинакоидом c по отношению к ребрам между гранями c и a кристалла или по отношению к ребрам между c и косыми гранками.

Зная о взаимных отражениях призм и пинакоида, невозможно принять их за отблески зональных граней.

Таким образом, применение опак-иллюминатора в комбинации с федоровским столиком оказалось весьма эффективным как при микроскопическом изучении рельефа на кристаллах берилла, так и для приближенного измерения углов между микроскопически малыми гранками. Этим методом удалось определить боковые (торцевые) поверхности слоев роста на гранях пинакоида берилла в одних случаях прямыми измерениями с точностью до $\pm 1/2^\circ$, а в других — косвенными.

III. ДЕТАЛИ РЕЛЬЕФА КРИСТАЛЛОВ БЕРИЛЛА

1. Слоевые линии и ступенчатое строение площадок пинакоида

На рис. 1 слоевые линии за редкими местными исключениями образуют гексагональный узор со сторонами, сходящимися под углом 120° , причем узор этот первого рода: линии параллельны ребрам между гранями c и a кристалла. Несмотря на это, зонарный рисунок верхних площадок выступов резко не соответствует контуру наружной призматической оканки выступов в том смысле, что слоевые линии нередко не концентричны с береговой линией выступа, а направлены впритык к ней.

Слоевые линии представляют собой в основном весьма узкие грани призмы первого рода $a\{10\bar{1}0\}$, а местами гексагональной дипирамиды $p\{10\bar{1}1\}$.

На рис. 1 преобладающее количество слоевых линий представляет собой, повидимому, очень тонкие грани призмы a^1 , а не дипирамиды p , причем в этом отношении намечаются следующие закономерности. На крупной ступенчатой площадке (западная половина зарисовки) все линии являются призматическими тонкими гранями, за исключением восточных «полуостровов» этого «континента», на которых некоторые периферические линии оказываются косыми гранками. Заметное число косых гранок приурочено к мелким выступам на юго-восточном квадранте зарисовки. Здесь на некоторых из выступов все линии являются косыми гранками (например, рис. 5), а на иных только периферические линии являются косыми гранками, т. е. в непосредственной близости от явных косых граней с трапециoidalным и треугольным сечением. Косые грани зонарного узора нередко непосредственно предшествуют граням того же символа, расположенным в краевых частях выступов. Таким образом, среди зонарных узоров косые грани приурочены к периферической части более крупных выступов и к тем районам, где образуются

¹ Об этом можно судить только по световым эффектам.

мелкие выступы, по форме приближающиеся к скелетным. Впрочем, имеют место иногда обратные явления. Так, на обломке другого образца наблюдались на одной террасе с зонарные контуры — и «призматический» и «косой», развивающиеся навстречу друг другу.

Каждая из линий зонарного контура в подавляющем большинстве случаев прямолинейна и лежит в зоне ребра между *a* и *c*. В виде исключения можно заметить небольшие местные отклонения от параллельности — извилистость, закругление углов зонарного контура, а также притупление углов короткими отрезками, лежащими в зоне ребра между пинакоидом *c* и гексагональной призмой второго рода *b*{1120}. Согласно наблюдениям на федоровском столике, эти отрезки являются в одних случаях гранками призмы *b*{1120}, а в других — гранками гексагональной дипирамиды второго рода *s*{1121}. Еще более редки отрезки, соответствующие дигексагональным призмам и дипирамидам.

Ширина слоевых линий, промеренных под микроскопом,— от еле различимой, при которой наличие линии улавливается лишь появлением светлой полоски при дефокусировании, чаще же 1—5 μ , редко до 10 μ . Наиболее тонкие линии скорее всего являются призматическими уступами. Однако надо иметь в виду, что при помощи федоровского столика были обнаружены также и явные весьма тонкие косые грани шириной 1 μ и даже тоньше. Таким образом, только тонкость линии еще не является надежным критерием того, что это грань призмы, а не дипирамиды. На рис. 1 в виде редкого исключения были найдены линии шириной 20 μ и в одном случае 28—30 μ (рис. 5). Исходя из указанной ширины линий, вертикальная высота уступов между соседними террасами (когда уступами являются косые грани) должна находиться в пределах от еле различимой под микроскопом до 14—15 μ .

Ширина зонарных площадок пинакоида колеблется чаще от 30 до 150 μ , редко меньше или больше — до 200 μ . В виде исключения ширина достигает 0,5—1 мм. Сравнение этих данных с высотой уступов показывает, что ширина площадок в среднем в 50—60 раз больше, чем высота уступов, но какой-либо строгой закономерности в этом не наблюдается.

Указанные величины относятся только к рис. 1. Изучение обломков других образцов свидетельствует нередко о значительно большей высоте уступов и ином соотношении между шириной террасы и высотой уступа.

Как указано ниже, между призматическими и косыми гранками зонарных узоров и соответствующими гранями кристаллов нет принципиальной разницы и существуют переходы.

К некоторым другим деталям, касающимся поверхности ступенчатых пинакоидов, придется еще вернуться.

2. Впадины

При рассматривании впадин в отраженном свете дно их представляется темным тонкорельефным с довольно редкими блестками мельчайших рассеянных площадок пинакоида. Без опак-иллюминатора можно видеть, что дно впадин состоит из берилла и представляет собой шероховатую или матовую неровную поверхность, на которой путем фокусирования «промеряются» на разных участках разнообразные глубины — обычно от 0,1 до 1,1 мм (рис. 1, б). По этим признакам можно полагать, что при образовании кристалла берилла на участках, представляющих ныне дно впадин, произошла остановка роста, в то время как на других участках продолжался рост выступов.

Кроме основных впадин, окружающих отдельные выступы со всех сторон, имеются более мелкие на самих площадках ступенчатых пинакоидов. Размер этих впадин — от еле различимых под микроскопом до довольно крупных, как это видно на рис. 1—3 и других. Впадины имеют часто вычурный зигзаговидный и извилистый контур. Посередине некоторых впадин, расположенных в окружении выступа, имеются в свою очередь еще более мелкие выступы, увенчанные пинакоидом, для которых характерны меньшая высота по сравнению с берегами впадин и скелетное очертание боковой поверхности. Но и на этих более мелких выступах опять же можно разглядеть мельчайшие впадинки.

Впадины имеют двоякий облик (рис. 2 и 3). В одних случаях они являются мелкими и более или менее изометричными. Такие впадинки располагаются на площадках пинакоида. В других случаях впадины имеют более крупные размеры и нередко вытянутую форму; впадины этого типа представляют собой частично «озера» на площадках пинакоида, но главным образом «заливы» или «моря». Происхождение впадин того и другого типа, вероятно, различное.

3. Огранка боковых поверхностей между впадинами и выступами

Несмотря на то, что для габитуса кристаллов берилла данного типа характерно наличие почти исключительно лишь граней призмы *a* и пинакоида *c*, в микроскульптуре поверхности кристаллов участвует громадное число граней других форм. Они присутствуют не только в виде весьма тонких линий на плоскостях *c*, создавая на них гексагональные узоры, но и участвуют в огранке боковых поверхностей между впадинами и выступами, причем здесь их размеры несколько больше, а вид нередко более приближается к обыденному. Высота призматических граней равна вполне различимой высоте выступов, а грани дипирамид

хорошо различимы под микроскопом и часто имеют вид треугольных или многоугольных площадок, а не узких полосок.

Между тем как уступы (зонарные узоры) на площадках пинакоида составлены почти исключительно формами первого рода, т. е. призмой *a* и дипирамидой *p*, огранка боковых поверхностей между впадинами и выступами состоит из призмы не только первого рода, но и второго рода и дигексагональных призм (и часто даже с преобладанием их над призмой первого рода).

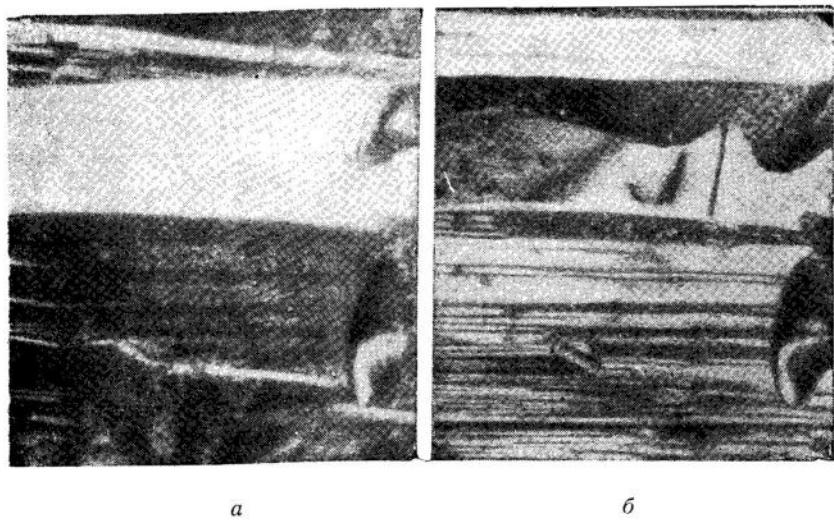


Рис. 7. Боковая поверхность выступа, состоящая из тонкоребристых и вицинальных гранок призмы. Справа — ребро между призмами и пинакоидом. Положение *b* отличается от положения *a* наклоном оси *I* на 6°. Микрофотография в отраженном свете на федоровском столике. $\times 52$

а также из заметного количества косых граней, среди которых резко преобладают грани дипирамиды первого рода.

Строение призматических боковых поверхностей на границе выступов и впадин удается выяснить наблюдениями в отраженном свете при помощи федоровского столика над мелкими обломками кристаллов, юстированных призматической зоной параллельно оси *I* столика. На одних интервалах боковой поверхности имеются довольно гладкие, плоские (почти без вицинальных перегибов) грани призм с редкими, весьма тонкими продольными полосками, каждая из которых продолжается от верхнего ребра грани до ее основания. Вероятно, такие полоски являются ступеньками роста и, например, на грани призмы первого рода могут представлять тонкие грани гексагональных и дигексагональных призм. На других интервалах боковая поверхность не-

редко отличается значительной неровностью (рис. 7) и состоит из многих тонких продольно вытянутых клиновидных гранок-вициналей, наклоненных под малыми углами то к верхнему краю, то, наоборот, к основанию боковой поверхности и в целом образующих сложный комплекс граней, вытянутых близко параллельно оси *Z* кристалла. Эти полосочки и клинышки образуют между собой разнообразные углы как входящие, так и выпуклые. В иных случаях боковая поверхность является еще менее разборчивой тонкоизвилистой, тонкоребристой, даже тонковолокнистой, но все же можно заметить, что волокна, вытянутые всегда грубо параллельно оси *Z*, попаременно сужаются то вверх, то вниз. Следует заметить, что ребра с верхней террасой с бывают обычно относительно более ровными, чем можно было бы ожидать при подобной неровной боковой поверхности. Надо полагать, что гладкие плоские призматические грани образуются при нормальных условиях роста кристалла в окружении питающей среды, а неровные, сложно построенные поверхности, вероятно, представляют собой одну из форм выклинивания призматических поверхностей наряду с более легко расшифровывающимися формами выклинивания, описываемыми ниже.

Перейдем к рассмотрению характера комбинаций граней на боковых поверхностях, причем сначала рассмотрим характер огранки впадин, расположенных на ступенчатой поверхности выступов, а затем несколько отличный характер огранки выступов, окруженных со всех сторон впадинами. Наиболее характерные комбинации граней вокруг впадин показаны на рис. 8, а вокруг выступов и их участков на рис. 9. Для удобства описания чередования граней, на этих рисунках и ниже в тексте индексы граней обозначены буквами с цифровым значком 1—6 (рис. 10).

Как видно из рис. 8, большинство впадин имеет извилистые, реже округлые очертания, однако трудно найти впадины, в которых наряду с извилистыми призматическими гранями не встречались бы и отчетливо видимые плоские грани, нередко плоские грани даже преобладают. Иногда впадины ограничены только плоскими гранями. Среди плоских резко преобладают грани *b* (рис. 8, *в*, *г*, *ж*, *з*, *е*), в весьма подчиненном количестве имеются грани *a* и $\{hk\bar{i}O\}$ (символы ближе не определены)¹. Лишь изредка можно найти впадины с гранями только *a* или только $\{hk\bar{i}O\}$ в комбинации с извилистыми (рис. 8, *к*), а также впадины с гранями только *b*, в том числе мелкие правильные шестисторонние

¹ С. Бани и Г. Эммет наблюдали под микроскопом на растущих из водного раствора кубических кристаллах $NaCl$ и тетрагональных KH_2PO_4 образование впадинок. Гранки наблюдавшей ими впадинки образуют с гранью кристалла угол в 45° , т. е., как и в случаях с бериллом, впадинки ограничены гранками также второго рода [21].

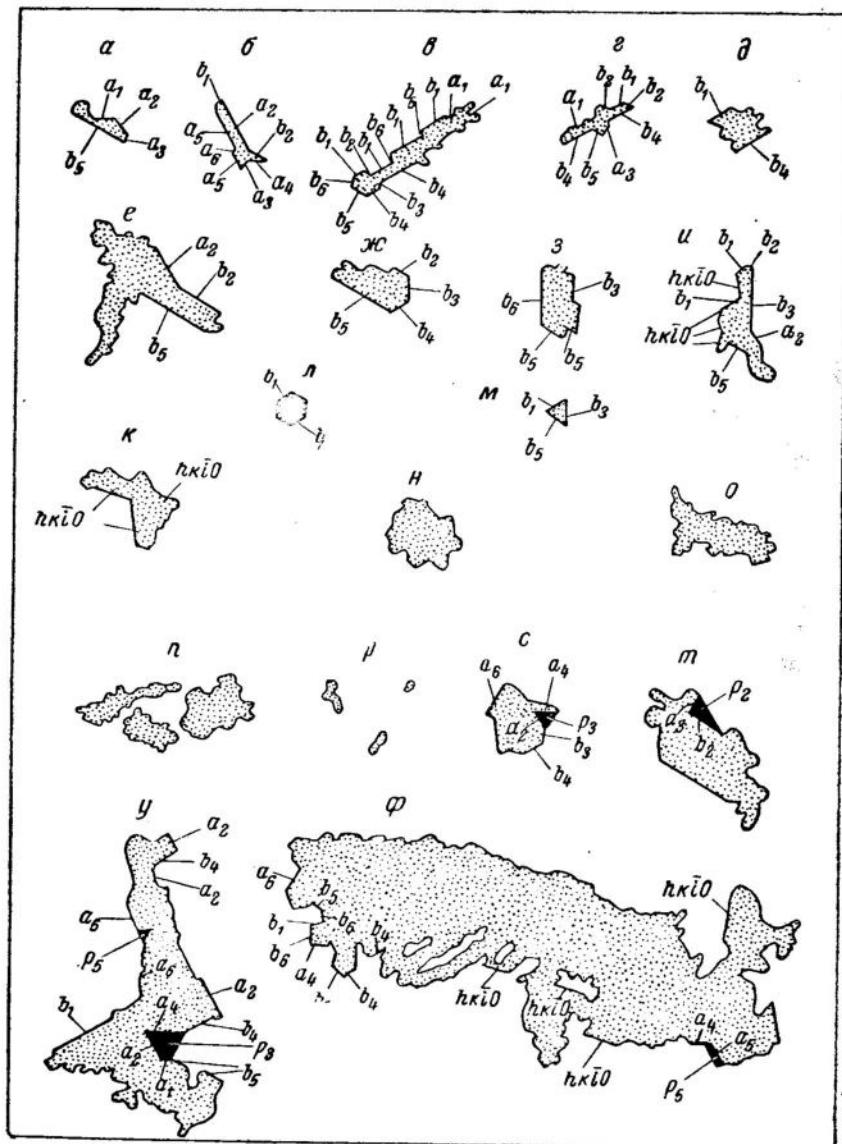


Рис. 8. Характер огранки впадин на грани пинакоида (детали к рис. 1). Точечные поля — дно впадин. Линии — ребра между гранями пинакоида и призм. Черные площадки — грани гексагональных дипирамид. $\times 57$

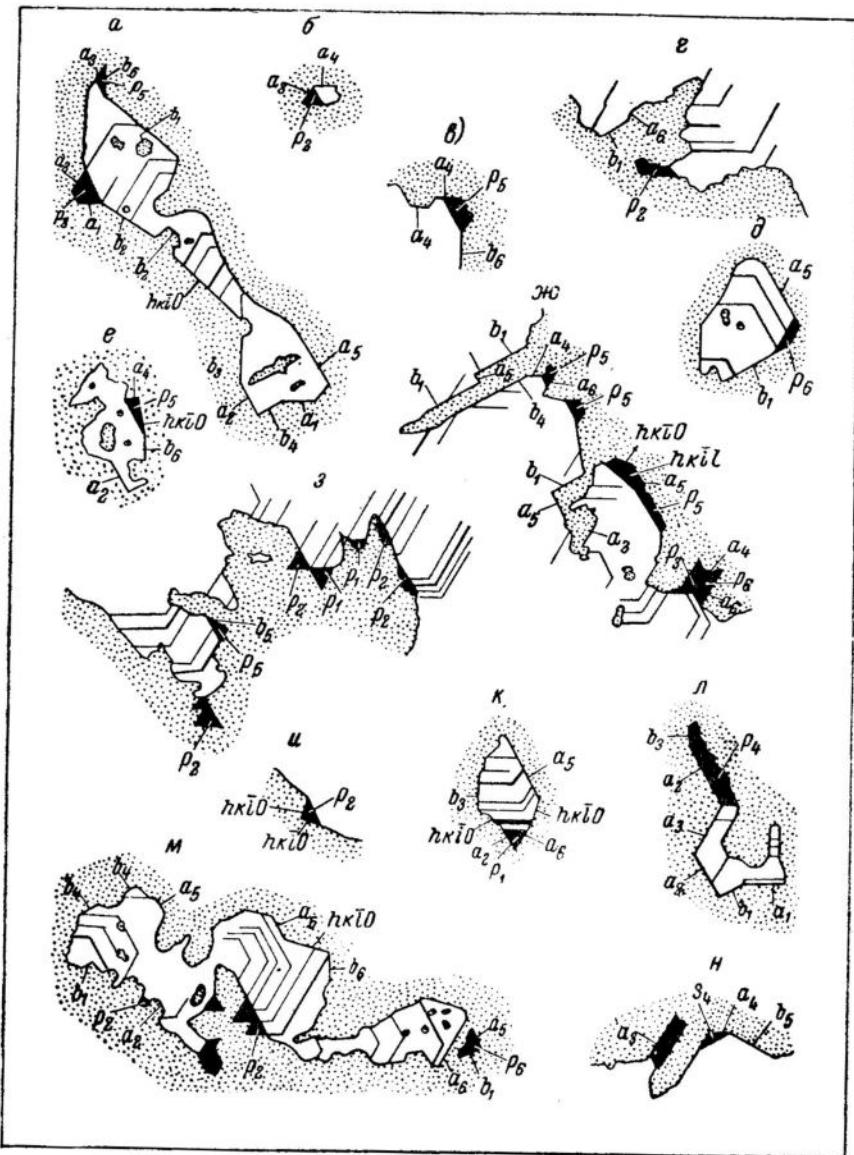


Рис. 9. Характер огранки выступов (детали к рис. 1). Черные концентрические линии — уступы слоев роста на ступенчатых граниях пинакоида (белые участки). Черные площадки — грани гексагональных (иногда дигексагональных) дипирамид, являющиеся верхними ограничениями призматических клиньев. Точечные поля — впадины. $\times 47$

(рис. 8, л) или трехсторонние (рис. 8, м). Характерна ступенчатость берегов впадин «в плане», благодаря чередованию призматических граней одних и тех же индексов, что создает перемежаемость выпуклых и входящих углов. Наблюдается также и пропуск граней для формы *a* (рис. 8, б, грань *a*₃ находится не рядом с *a*₄, а с *a*₅) и *b* (рис. 8, м, нет граней *b*₂, *b*₄ и *b*₆). У берегов впадин изредка можно найти отдельные косые грани, причем только дипирамиды *p* (рис. 8, с — 8, ф). Косые грани видны под микроскопом, если их осветить соответствующим образом на-

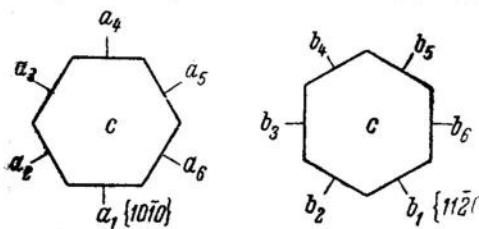


Рис. 10. Упрощенные обозначения индексов граней

направленным светом или с помощью федоровского столика привести их в положение, перпендикулярное прямому отраженному свету опак-иллюминатора.

Для огранки выступов (рис. 9) также характерны зигзагообразные и извилистые контуры, нередко с узкими длинными мысами — полуостровами — и

такими же заливами — впадинами. В сооружении берегового призматического контура наряду с призмой первого рода *a* чуть ли не в равной мере принимает участие и призма второго рода *b*, а местами еще и дигексагональные призмы. Причем эти грани располагаются то в нормальной последовательности (восточная часть рис. 9, а, д), то с повторяющимся чередованием (северная часть рис. 9, ж), то с пропуском граней. Лишь на отдельных коротких участках можно наблюдать огранку только из граней *a* с выступающими или входящими углами. Чаще же в огранке принимают участие как грани *a*, так и *b* в чередовании еще и с извилистыми участками, а местами грани *b* резко преобладают. Наконец, характерно весьма заметное присутствие и косых граней — значительно чаще, чем по берегам впадин, расположенных на гранях пинакоида. Косыми в подавляющем большинстве являются грани гексагональной дипирамиды первого рода *p*, и лишь в виде исключения можно найти дипирамиду второго рода *s* (рис. 9, н) или дигексагональные дипирамиды (рис. 9, ж, средняя часть).

Для многих мелких выступов («островков») наряду с подобной огранкой характерны удлиненные поперечные контуры, приближающиеся к скелетным формам (рис. 9, а, е, м), и резкое несоответствие между внутренним зонарным рисунком верхней площадки и ее береговым контуром.

4. Выклинивание выступов в сторону впадин

Для огранки боковой поверхности как крупных, так и мелких выступов, увенчанных простым или ступенчатым пинакоидом, характерно такое выклинивание (на небольших отрезках береговой поверхности) выступа в сторону впадины, при котором клин образуется комбинацией двух (или более) граней призмы, обычно под углом 60 или 90°, и одной грани дипирамиды.

Клин обычно приурочен к месту перегиба контура выступа и формируется чаще из граней призмы первого рода *a*, иногда в комбинации также с гранями *b*, {*hkiO*} и извилистыми, и почти всегда с участием грани дипирамиды, которой, как указано выше, является почти исключительно грань *p*. Призматических граней, составляющих клин, обычно бывает только две (рис. 9, б, е, и, л), реже три (рис. 9, а, на западе, рис. 9, д) и совсем редко более трех (рис. 9, ж, {*hkiO*}, рис. 9, к, на юге, рис. 9, н, на западе). Поэтому косая грань, заостряющая клин сверху, чаще представляет собой площадку треугольную, реже трапециoidalную или извилистую и совсем редко многогранную (более четырех ребер).

Треугольные равносторонние (в проекции на плоскость *c*) косые площадки получаются в связи с полным зарастанием призматической грани *a* (например, грани *a*₂ на рис. 9, б или грани *a*₁ на рис. 9, л), лежащей в одной зоне с косой площадкой *p*_n (на рис. 9, л, грань *p*₁), вследствие чего клин ограняется тремя гранями торможения¹ — двумя призматическими *a*_{n-1} и *a*_{n+1}, сходящимися под углом в 60°, и дипирамидальной *p*_n (на рис. 9, л грани *a*₂, *a*₆ и *p*₁). Треугольные косые площадки с одним углом, равным или близким (в проекции) к 90°, получаются при образовании клина призматическими гранями одной *a* и другой *b* (рис. 9, з, грань *p*₅) или {*hkiO*} (рис. 9, е).

При неполном зарастании передней грани клина *a*_n получается трапециoidalная косая грань *p*_n (рис. 9, а, грань *p*₃), на первый взгляд по своему очертанию как будто более обыденная для кристаллов, чем треугольная грань *p*_n, но на самом деле с обратным расположением оснований трапеции. Если грань *p* в комбинации с *a* и *c* обычно является трапецией с более длинным основанием наружу (являющимся ребром между *p* и *a*, рис. 11), то при клиновидной комбинации граней *a* грань *p* чаще треугольная, реже трапециoidalная, но с более коротким основанием

¹ Гранями торможения называют грани с небольшой скоростью роста по сравнению со скоростью роста других граней кристалла [18, стр. 25], [21, Сб. I, стр. 82—84]. Гранями полного торможения мы называем грани со скоростью роста, равной нулю.

наружу. При этом ребра между p и a должны иметь своеобразные символы.

Местами можно наблюдать «двойные» клинья с ростом сначала по типу трапеции, а затем с раздвоенным заострением на треугольники (рис. 9, k , грань p_2) или в виде пары треугольников (рис. 9, z , юг). Иногда можно заметить и другие оригинальные закономерные «пары» клиньев (рис. 9, z , середина). Из довольно редких разновидностей косых площадок стоит отметить двускатные (рис. 9, $ж$, восток) и односкатные изолированные, т. е. вовсе без примыкающего пинакоида (рис. 9, $к$, восточная косая площадка). Двойные клинья типа рис. 9, k можно рассматривать не только как росшие сначала по типу трапеции, но и как два отдельных клина, слившихся при разрастании. При первом предположении призматические грани, составляющие клин, скорее являлись гранями полного торможения, т. е. имели скорость роста, равную нулю. Во втором случае грани клина должны были быть гранями торможения, но никак не могли быть гранями полного торможения. Верхние же косые грани клиньев должны были быть гранями полного торможения.

Надо полагать, что такие клинья появляются на поверхности кристалла в тех местах, где в минералообразующем неоднородном растворе оказывался недостаток питательных для берилла компонентов, что могло происходить, очевидно, незадолго перед концом кристаллизации этого минерала. О том, что клинья не являются остатками после растворения боковых участков выступа, а являются наростами на боковой поверхности, можно судить по частой приуроченности клиньев к краям и к выпуклым перегибам боковой поверхности выступов, где растворение происходило бы наиболее интенсивно и менее всего было шансов на сохранение клиньев. В этих местах должно было бы происходить максимальное растворение и закругление формы выступа (аналогично закруглению кристалла у ребер и вершин при растворении). Между тем, в наших случаях получается не закругление выступа, а еще большее приострение его (клин), что является, очевидно, следствием роста. Форма клиньев и их соотношения с верхней площадкой пинакоида приводят также к заключению, что эти клинья могли образоваться наслоением кристаллического вещества не на грани пинакоида, а на грани призмы (на боковой поверхности выступа). Этот вывод, важный для изучения механизма роста кристалла, подкрепляется материалами, излагаемыми ниже в главе V.

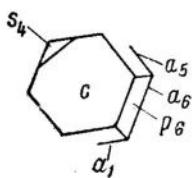


Рис. 11. Обычные контуры граней гексагональных дипирамид

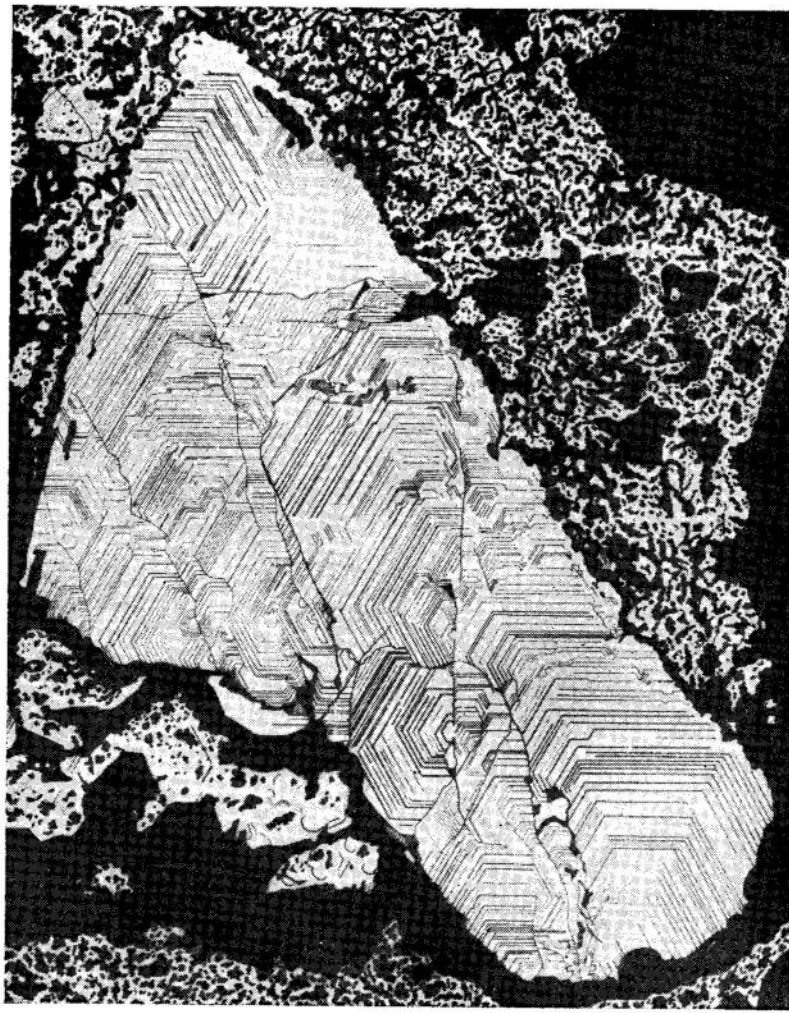
5. Блоки и швы нарастания блоков

Интересные структуры были выявлены на площадках пинакоида довольно крупного штуфа высотой 6 см и в поперечнике 6 × 3,5 см, являющегося обломком сростка кристаллов, расположенного параллельно их призматическим граням. Сросток этот двухконечный, со стороны обоих концов имеется ряд уступов, каждый из которых увенчивается площадкой пинакоида со сложным скульптурным узором. На одном конце кристалла разность высоты отдельных уступов достигает 1 см. Боковая поверхность штуфа является поверхностью разлома с призматической ребристостью, а местами ограничена несовершенными гранями призм того или иного из сросшихся индивидов. Штуф имеет пятнистую светлоzelенную и белую окраску, слабо прозрачен. Часть его поверхности, особенно боковой, покрыта агрегатом наросших кристаллов мусковита. Объектом детального изучения явилась одна из наиболее крупных площадок пинакоида, зарисованная под микроскопом в отраженном свете. Кроме того, изучалась структура поверхности мелких обломочков от этого образца.

Зарисованная площадка (рис. 12) не имеет сильно изрезанных берегов, и на ее поверхности мало впадин. Окружающей довольно узкой впадиной она отделена от целой серии более мелких и совсем мелких выступов, последовательно понижающихся во все стороны от нее. Как на поверхности основного выступа, так и на остальных более крупных выступах имеется того же типа гексагональный ступенчатый рельеф, что и на рис. I, и такие же косые треугольные грани p , но в небольшом количестве и лишь вблизи краев выступа. Сложную площадку выступа прорезают несколько слабо извилистых трещин (в отраженном свете при опускании тубуса две световые полоски перемещаются в стороны от черной трещины, при поднятии тубуса они уходят в трещину).

Новым по сравнению с рис. I является то, что площадка состоит из целого ряда блоков с самостоятельным в каждом из них, хотя и параллельным, зонарным рисунком, причем блоки с самостоятельными рисунками разграничиваются один от другого швами в виде черных линий. На более мелких выступах (например, у северо-западного угла рис. 12) тоже можно заметить строение из блоков.

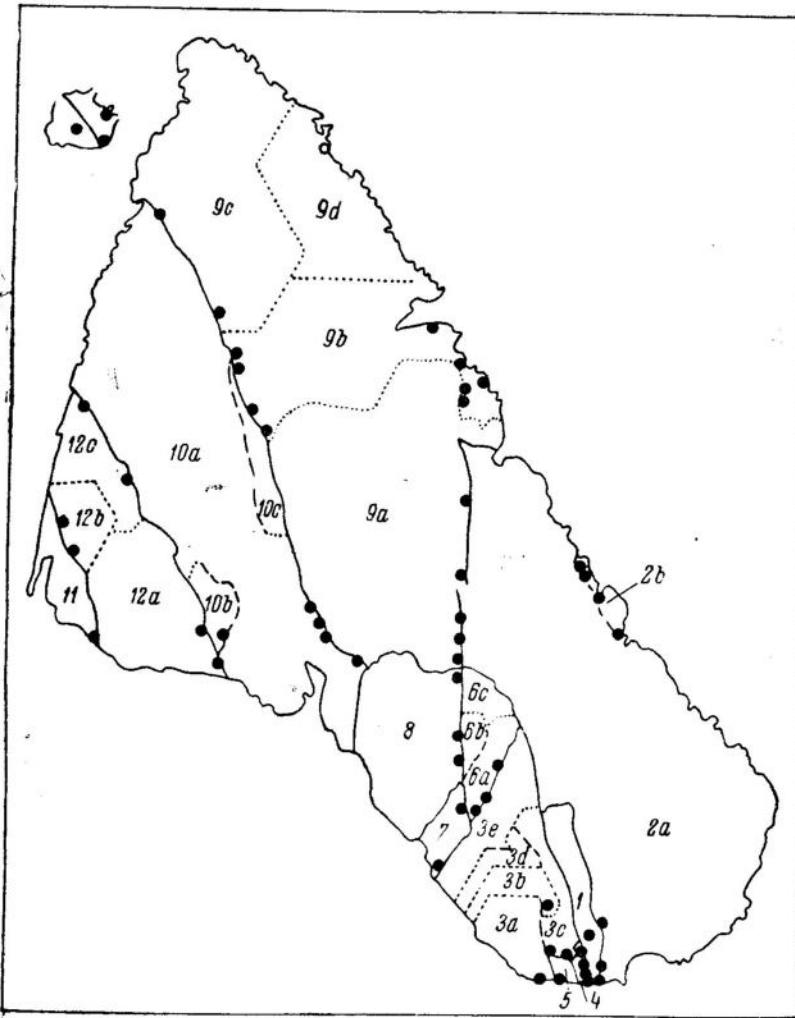
Слоевые линии распределяются концентрическими системами, причем на границах этих систем видно их «несогласие»: наличие входящего угла, разная ширина линий и промежутков между ними, разное число линий на одном и том же интервале и ко всему этому — наличие линии стыка (шва). Самостоятельность зонарного рисунка каждого из блоков находится в связи с тем, что рисунок возникает и развивается в каждом блоке от одного или нескольких центров кристаллизации, расположенных



5мм

a

Рис. 12. Ступенчатое и блочное
a — скульптура грани под микроскопом в отраженном свете; белые участки — пинакоида; отдельные черные линии — швы нарастания блоков
b — детали последовательности роста блоков; сплошные линии — швы нарастания; тонкие — границы полублоков и других частей блоков; жирные точки — центры полублоков и



b

строительство грани пинакоида берилла:

площадки пинакоида; черные концентрические линии — уступы на ступенчатой грани и частично трещинки. Зарисовка К. Ф. Невской. $\times \sim 14$;
 ния блоков (и границы блоков), штриховые — швы нарастания полублоков, пунктирные — границы систем слоев роста; цифры — номера блоков, буквы — номера частей блоков

иногда на краю всей площадки или около мелких впадинок, но чаще на линиях швов. При этом зонарный рисунок развивается от центра кристаллизации (у самого шва) только в одну сторону от шва, что свидетельствует, во-первых, о том, что развивающийся рисунок относится к блоку более позднему, чем смежный блок по другую сторону шва, и, во-вторых, что каждые две соседние точки в смежных блоках образованы не только в разное время, но и с перерывом во времени. Важность последнего условия в том,

что любые две соседние точки внутри одного и того же блока также образуются последовательно, но не разделены перерывом во времени.

Таким образом, швы между блоками являются не швами срастания (одновременного), а швами нарастания одного блока на другой.

Можно привести следующие доводы в пользу наличия перерыва во времени образования смежных частей двух блоков, разделенных швом:

1. Из двух отрезков шва *BAC* вдоль одного из них *AC* (рис. 13) развитие зонарного рисунка в смежных блоках 1 и 2 направлено вдоль шва в противоположные стороны.

Рис. 13. Перерыв в отложении кристаллического вещества при нарастании нового блока

Следовательно, каждая точка одного блока образовалась с перерывом во времени по отношению к смежной с ней точке другого блока, при этом чем дальше от *A* в сторону *C*, тем большей становится разница моментов образования смежных точек двух блоков. Поэтому есть основание считать, что шов именно и свойствен образованию смежных блоков в случае перерыва во времени, т. е. при нарастании одного на другой. В таком случае наличие шва и на отрезке *AB* должно свидетельствовать о перерыве во времени образования смежных частей двух блоков и на этом участке, чему не противоречит одинаковая направленность распространения зонарных рисунков обоих блоков на этом отрезке.

2. Обратное явление, т. е. отсутствие шва, наблюдается при одновременном срастании смежных точек соседних участков:

а) внутри отдельного блока, например в северной половине блока *2a* (рис. 12, а, б), на той или иной слоевой линии или на системе смежных линий появляются входящие углы, которые затем ликвидируются на соседних объемлющих зонах без образования шва;

б) слияние параллельных систем слоевых линий, развивающихся навстречу от двух или нескольких центров кристаллизации, происходит без образования шва, например внутри блока *9a* и многих других (рис. 12, а, б).

Главной отличительной особенностью любых двух смежных точек по ту и другую сторону шва нарастания является различная их высота. Наличие шва нарастания, т. е. линии (узкой поверхности), по обе стороны от которой смежные блоки имеют разную высоту, и является результатом перерыва во времени отложения смежных частиц соседних блоков. Только благодаря такому перерыву один блок и успевает вырасти несколько выше, чем смежный с ним более поздний. Светлая полоска при дефокусировании в отраженном свете указывает на то, что на всем протяжении швов нарастающие блоки всегда немного ниже, чем смежные с ними обрастающие. Этим шов нарастания отличается от трещины¹. Таким образом, нарастающие блоки по сравнению с обрастающими несколько отстают в своем развитии как в ширину (вперед), так и вверх.

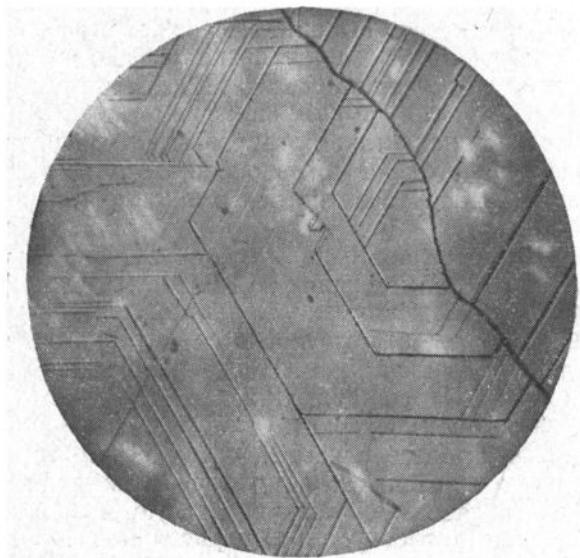
Как и боковые поверхности выступов вокруг впадин, швы нарастания на различных интервалах то извилисты, то прямолинейны, причем прямолинейные отрезки, то параллельны осям *X*, *Y* или *W*, то перпендикулярны им, то являются отрезками, соответствующими дигексагональным призмам или дипирамидам (рис. 14).

Изучением срезов с площадки (рис. 12, а) удалоськосвенно (по световым эффектам) установить, что все слоевые линии и швы нарастания являются здесь призматическими гранками. Разница между ними в том, что при соответствующем наклоне площадки торец слоя представляет собой тонкую светлую, равномерной толщины и освещенности полоску, а шов нарастания — полоску неодинаковой толщины, местами четочную, с тонким рельефом, зазубринами и т. п. Для изучения на федоровском столике удалось найти шов нарастания на обломке ступенчатого пинакоида с другой площадки того же штуфа. Шов этот оказался с тонкоизвилистой и тонковолокнистой призматической поверхностью высотой 0,2 мм, подобной описанным выше ограничениям выступов. Было отчетливо видно, что кристаллические зародыши располагаются у подошвы такого шва. На других обломках можно было наблюдать мелкие кристаллики то с призматическими, то с пирамидальными ограничениями. У подошвы пирамидальных гранок никогда не наблюдалось центров кристаллизации, а у призматических — зародышевые центры имеются сплошь и рядом. Следовательно, швы нарастания должны представлять собой не косые, а призматические плоскости.

Последовательность развития блоков наглядно представлена на рис. 12, б, где показаны границы двенадцати блоков. Начало образования каждого блока раньше начала образования смежного с ним, обозначенного более высоким порядковым номером. Внут-

¹ Кроме того, при опускании тубуса микроскопа трещину можно проследить и внутри прозрачного кристалла, между тем как шов можно видеть только на поверхности.

ри многих блоков выделены дробные части для более детального уяснения последовательности их образования. Суждения о последовательности образования блоков и их частей основаны на предположении, что скорость нарастания (в направлениях, параллельных плоскости c) разных сторон одного блока и вообще разных



*Рис. 14. Смыкание на поверхности ступенчатого пинакоида двух систем слоев. Правая система развивается от шва нарастания. Вследствие небольшого дефокусирования рядом с черными линиями видны белые полоски, свидетельствующие о том, что по линии смыкания слоев левый слой выше правого. Белые блики — внутренние рефлексы. Микрофотография в отраженном свете.

блоков в среднем примерно одинакова, так как ширина между зонарными линиями внутри каждого блока и для разных блоков колеблется в не-очень больших пределах. Исходя из этого, построены диаграммы последовательности развития блоков (рис. 15 и 16). Рост нарастающего блока заканчивается обычно позднее, чем рост обрастающего (рис. 16). Иногда же рост целого ряда блоков, например от блока 3 до блока 8, возникающих позднее блока 2, заканчивается раньше конца роста блока 2. Смыкающиеся части одного блока (например, части 9с и 9d, 12с и 12b, рис. 12, б), разумеется, заканчивают рост в местах смыкания одновременно, а возникают в разное время — каждая часть от своего центра кри-

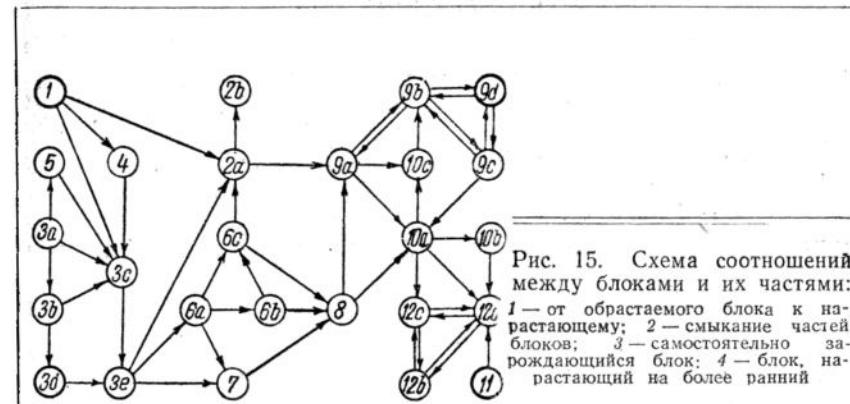


Рис. 15. Схема соотношений между блоками и их частями:
1 — от обрастваемого блока к назрастающему; 2 — смыкание частей блоков; 3 — самостоятельно за рождающийся блок; 4 — блок, назрастающий на более ранний

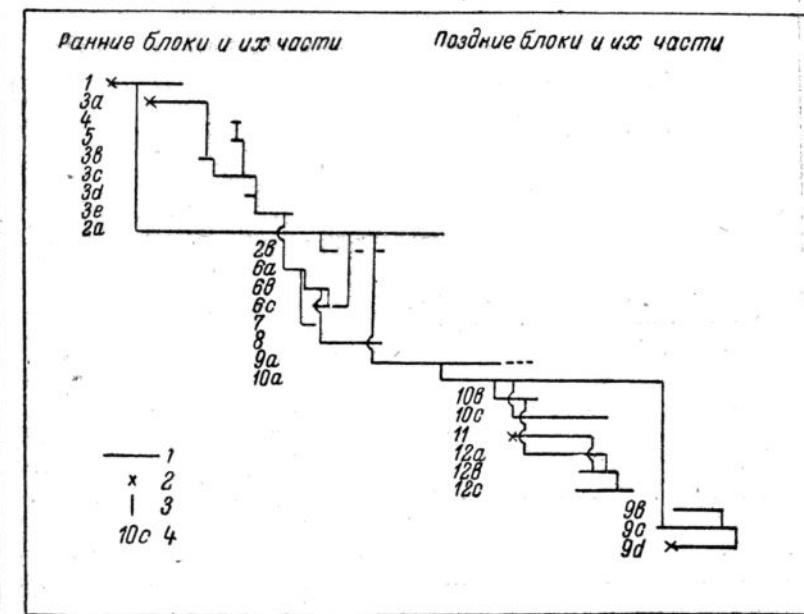


Рис. 16. Последовательность развития блоков и их частей:
 1 — период развития блока; 2 — блок, зарождающийся на стыке со смежными;
 3 — взаимосвязь нарастания блоков или срастания их частей; 4 — номер блока

стализации. В последовательном порядке возникновения занумерованы и некоторые не смежные между собой блоки, те, которые возникают не путем нарастания на смежный блок, а самостоятельно на краю всей площадки: например блок 11, не смежный с блоком 10, возникает ранее блока 12, смежного с блоком 10.

Остановимся еще на одной любопытной особенности сочетания частей блока. Внутри некоторых блоков можно заметить швы в виде незамкнутых отрезков, разделяющих блок на две части

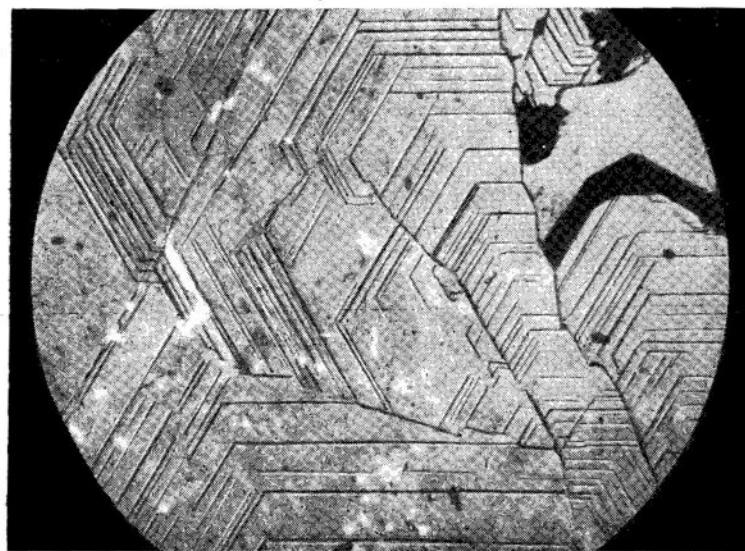


Рис. 17. Шов нарастания между блоками (справа, вдоль всего поля) и швы нарастания между полублоками (посередине, обрывистые). Микрофотография в отраженном свете. $\times 56$

лишь на некотором интервале, например: на рис. 12, *a*, *b* части 2*a* и 2*b*, 3*a* и 3*b*, 3*c* и 3*d*, 10*a* и 10*b*, 10*a* и 10*c* и др. До и после интервала, на котором имеется шов, блок представляется единым с согласным зонарным рисунком. Между тем на интервале шва по обе стороны рисунок перестает быть согласным. Назовем части блока по обе стороны такого шва в виде отрезка парой полублоков или просто полублоками. Очевидно, такие швы также являются швами нарастания: один полублок из пары начал отставать в росте и после некоторого перерыва во времени продолжал нарастать на второй полублок с образованием шва. Шов кончается тогда, когда нарастающий полублок догонит в росте другой полублок своей пары (рис. 17). Это наиболее убедительно объясняется на примере пары полублоков 3*a* и 3*b*, где не только зонарный ри-

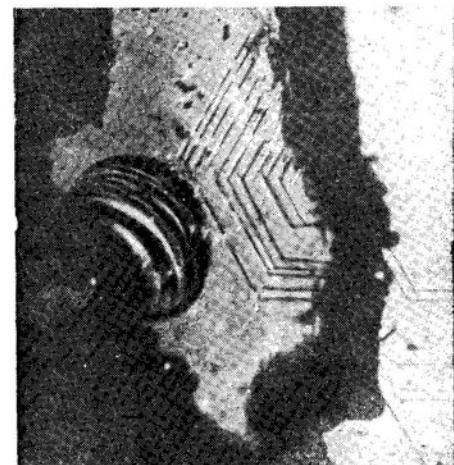
сунок не согласен в силу разной ширины между зонарными линиями и разного их числа (как на паре полублоков 3*c* и 3*d*) или в силу также наличия входящего угла (на паре 10*a* и 10*b*), но где имеется еще более явное доказательство перерыва в развитии части 3*b* ввиду наличия центра кристаллизации у восточной стороны шва. С этой точки зрения, может быть, не являются самостоятельными и такие блоки, как 2 и 9 (рис. 12, *b*), поскольку шов между ними на некоторых коротких интервалах прерывается. Таким образом, картина строения в виде блоков нарастания в деталях далеко не отличается простотой.

6. Центры кристаллизации и разрастание зародышей

По развитию рисунка слоевых линий можно судить о местонахождении центров кристаллизации (или зародышей) систем слоев и о некоторых закономерностях в распределении этих центров (рис. 1, *a*, *b*, 12, *a*, *b*).

Рис. 18. Очертания слоев роста на площадке пинакоида (серые участки) образуют линейный узор в виде концентрических полушестьсторонников, опирающихся на границу между площадкой и впадиной (черное). Пример зарождения системы слоев на берегу впадины.

Слева — механическое повреждение кристалла (раковинчатый излом). Справа — более высокая площадка (белая) не в фокусе. Микрофотография в отраженном свете. $\times 113$



Как бы ни был мал первый, ближайший к центру кристаллизации зонарный контур, он почти без исключений представляет собой неполный гексагон — полушестьсторонник,¹ опирающийся на шов с более ранним блоком, или на край всей площадки, или даже на берег впадины (рис. 18). Сторон такого неполного гексагона обычно бывает 3 или 4, реже 2 или 5. Полные шестьсторонники можно найти в виде исключения на рис. 1, их нет совсем на рис. 12. Поскольку полушестьсторонник опирается на некоторую

¹ Аналогичное явление имеет место при нарастании кристаллов на стенки полостей: вместо полного многогранника кристалл получает форму половинчатого многогранника с центром кристаллизации на стенке полости.

линию, его крайние стороны обычно короче средних, причем центр кристаллизации находится точно на этой линии. Можно насчитать не менее 22 зародышей¹ на рис. 1 и 55 зародышей на рис. 12. При этом нет достаточных оснований считать образованными из самостоятельных зародышей многочисленные мелкие выступы на рис. 1. Они скорее всего образовались путем выклинивания, не полного роста кверху более крупного единого кристаллического тела. Там же, где видны полигексагоны, к тому же с зонами, развивающимися навстречу, имеются новые зародыши. Зародыши на рис. 12, б по месту возникновения распределяются следующим образом:

1) зародыши, возникшие не в стыке с более ранним блоком, а самостоятельно:	
а) на самом краю всей площадки, на юге (в блоках 3а и 11)	2
б) вблизи края на юге, вероятно, вокруг внутренней впадинки (в блоке 1)	1
в) на самом краю всей площадки, на севере (в блоках 9б и 9д)	3
2) зародыши у шва с более ранним блоком (во всех блоках кроме 1, 5 и 11)	47
3) зародыши одновременно на краю площадки, на юге, и у шва с более ранним блоком (в блоках 2а и 5)	2
Всего зародышей	55

Эти данные указывают, что образование зародышей происходит с несравненно большей легкостью у шва уже ранее образованного блока, чем самостоятельно на краю всей площадки, причем для начальных зародышей край площадки является более благоприятным, но не единственным возможным местом образования зародыша. Так, блок 1, самый ранний, начал развиваться, вероятно, не у края площадки, а вокруг некоторого газообразного или, скорее, жидкого включения в растворе, служившего питательной средой для кристаллизации берилла. Вероятно, поверхность указанного включения играла роль катализатора или адсорбента при кристаллизации берилла, а на месте самого включения осталась впадинка.

Число зародышей в каждом блоке от 1—2 до 17. Величина частей блока, образованных развитием от разных зародышей, неодинакова, что указывает на образование зародышей в одном блоке в разное время.

Слоевые линии, ближайшие к центру зародышей, имеют почти всегда изометричный облик, разумеется, с учетом их половинча-

¹ Везде наблюдается не один слой, а целая система слоев. Каждому слою системы должен соответствовать свой центр кристаллизации. Поэтому там, где говорится о центре кристаллизации или зародыше, надо понимать не зародыш одного слоя, а целую группу зародышей одной системы слоев, возникающих последовательно один над другим. Некоторые детали локализации отдельных зародышей из такой группы выясняются в главе VIII.

тости. Продолговатые полушестьсторонники — редкое исключение. Их всего лишь 5 из 55 зародышей, указанных на рис. 12 (в блоках 6а, 7, 9б, 9с и 10а; особенно выделяется продолговатый зародыш в блоке 9с). В процессе дальнейшего развития продолговатые контуры быстро переходят в более изометричные, что особенно хорошо выражено в блоке 9с, где восьмой от зародыша контур уже почти вполне изометричен. Смыкание контуров от нескольких зародышей приводит к образованию менее изометричного единого контура, но при дальнейшем разрастании спектак контур становится все более изометричным (рис. 12, б, блок 10а и др.).

7. Основные черты роста блоков и выступов

Несмотря на тенденцию к изометричности, вытекающую уже из чисто геометрических свойств, конечный контур отдельных блоков или выступов отнюдь не изометричный, а часто вытянут с развитием отдельных блоков в направлении с юга на север или с юго-востока на северо-запад (реже в обратном направлении), а нередко еще и с ломанными и извилистыми ограничениями вплоть до скелетных.

Неизометрическая форма отчасти обусловлена тем, что в некоторых направлениях разрастание блока ограничивается краем той площадки, на которой он возник. Естественно, край основной площадки обрывает концентрические слоевые линии. Это свойственно почти всем краевым блокам рис. 12. Но подобные обрывы слоевых линий часто наблюдаются и вне края основной площадки — по линиям швов нарастания (см. рис. 12) и по границам выступов (см. рис. 1), что тем более интересно, так как линии ограничения блоков и выступов на ряде интервалов нередко прямолинейны и соответствуют граням призмы первого и второго рода, играющим роль граней полного торможения.

Наиболее примечательны две линии: 1) местами прерывистый и слабо извилистый, но в общем хорошо выдержаный шов, ограничивающий с запада блоки 2 и 6 (см. рис. 12) и соответствующий грани призмы второго рода b_3 (1210); 2) юго-западная граница наиболее крупного выступа на рис. 1 ступенчатая и несколько извилистая, но на ряде интервалов соответствующая грани призмы первого рода a_2 (1100).

Благодаря такой особенности разрастания блоки и выступы имеют вытянутый контур, причем и вдоль вытянутости они нередко разрастаются преимущественно в одном направлении. Так, наиболее обширный выступ, показанный на рис. 1, разросся на юго-восток почти до края всего кристалла, но очень слабо развился на север. Многие более мелкие выступы также разрастаются в одном направлении, причем сплошь и рядом происходит подвигание (вширь) всего одной (рис. 9, м) или двух (рис. 9, а, д и к)

узких призматических граней, и весь выступ ограничивается со стороны призматической боковой поверхности чуть ли не на 100% не гранями роста, а гранями полного торможения.

Отклонение формы блоков от изометричной вследствие обрыва зонарных контуров можно выяснить измерениями на рис. 12, исходя из предположения, что расстояния от центра кристаллизации до каждой из сторон или вершин периферической зоны пропорциональны скоростям роста. Оказывается, что разные стороны гексагональных контуров разрастаются обычно примерно одинаково. Отношение скоростей роста смежных сторон контура обычно составляет не более, чем 1 : 1,1, реже 1 : 1,2—1,4 и в виде исключения 1 : 1,6. Между тем коэффициент вытянутости (отношение длины к ширине) для разных блоков составляет от 2 до 4, реже 1,7 до 8, что резко не соответствует отношению скоростей развития сторон внутри блоков. При этом далеко не всегда стороны с несколько большими скоростями роста развиваются именно в направлении вытянутости блока.

Итак, блоки и выступы оказываются неодинаково развитыми вширь в разных направлениях. Получающийся контур лучше называть не асимметричным, а оборванным изометричным, так как контур блока определяется обрывом изометричных зон краем основной площадки или границей с более ранним блоком, с одной стороны, и швом, являющимся гранью полного торможения, с другой стороны, что нередко имеет следствием также вытянутость блока в одном направлении. Оборванность зон имеет двойкий характер, находясь в зависимости и от начальных условий образования и развития зародышей в виде полушеисторонников (т. е. в оборванном виде), и от конечных условий развития блока, когда гранью полного торможения в виде шва начинают определяться его конечные контуры. Что та или иная плоскость является не просто плоскостью торможения, а именно плоскостью полного торможения, можно судить по тому, что слоевые линии заканчиваются впритык к этой плоскости, т. е. обрываются ею.

Неправильно считать, что вытянутая форма создается благодаря различной скорости роста слоев в разных направлениях. Надо подчеркнуть, что (при малых различиях в скоростях роста в разных направлениях) рост в одних направлениях вовсе прекращается, в то время как в других — продолжается¹.

¹ В. Г. Ньюхауз получал в движущемся растворе кристаллики квасцов и других минералов «асимметричным, искаженным обликом за счет преимущественного роста отдельных граней» со стороны, встречающей поток раствора. На изображениях, воспроизведенных Д. П. Григорьевым [4, рис. 1, а], зонарного роста кристалликов Ньюхауза отчетливо видно, что «асимметричный, искаженный облик» кристалликов создается в значительной мере благодаря обрыву зон роста гранями полного торможения, параллельными направлению движения раствора. Таким образом, зонарная структура этих кристалликов также является оборванной изометричной, как и структуры на поверхности берилла.

Остается отметить следующие усложнения в процессе развития отдельных блоков и выступов: 1) входящие углы на отдельных слоевых линиях или на ряде смежных линий; 2) отрезки-перемычки, соединяющие между собой два смежных зонарных контура таким образом, что этот отрезок является продолжением одной из линий одного контура и упирается впритык в одну из линий другого контура. Эти, на первый взгляд мелкие, детали проливают свет на некоторые закономерности роста кристалла (см. главу VII).

8. Выводы

Основными элементами рельефа на гранях пинакоида берилла являются выступы, впадины и зонарные ступенчатые узоры — слоевые линии. Нами изучены также своеобразные клинья на боковой поверхности выступов, а также мелкие выступы, имеющие форму, приближающуюся к скелетной.

Все эти поверхностные структуры оказались структурами роста кристалла.

Боковые поверхности (торцы) слоев роста являются микроскопически мелкими плоскими гранками с простыми индексами.

Изучены также закономерности расположения кристаллических зародышей на гранях, и по этим данным выяснены детали комплексного развития кристаллов, в том числе их строение, из последовательно образующихся блоков, разделенных поверхностями, названными «швами нарастания». Особое внимание было обращено на наличие перерывов в образовании таких блоков.

IV. О ПОСЛОЙНОМ НАРАСТАНИИ ГРАНЕЙ БЕРИЛЛА И ГЕНЕЗИСЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР

Материалы о ступенчатой структуре граней пинакоида берилла, несомненно, указывают на то, что рост этих граней происходил слоями. Несравненно меньше данных имеется о послойном нарастании призматических граней. Так, на послойное нарастание призм указывают описанные выше клинья и продольные штрихи, а также обнаруженные Н. Ю. Икорниковой [13, стр. 543 и 544] продольные ступеньки роста на гранях *a* и *b*, поникающиеся от ребер к середине грани. Кроме того, Л. И. Гриффин интерферометрическим методом обнаружил, что вицинальные площадки на гранях берилла состоят из субмикроскопически тонких ступенчато расположенных слоев [31, стр. 192], а вицинали свойственны главным образом граням призм берилла. Еще меньше (почти нет) данных о послойном росте дипирамидальных граней этого минерала. Все же будет более правильным придерживаться взгляда, что послойное нарастание может быть свойственно всем граням берилла, так как установлено изучением поверхностных структур

минералов и непосредственным наблюдением роста кристаллов [2, 5, 13], что ступенчатые структуры и послойное нарастание свойственны не только граням пинакоида, но и призматическим и косым граням кристаллов ряда минералов гексагональной, тетрагональной и других сингоний.

Необходимо разобрать вопрос, вытекающий из соображений А. Н. Карножицкого, о том, что штриховка на некоторой грани может быть следствием нарастания слоев или на этой же грани, или на смежной с ней [16]. Наши кристаллы берилла ограничены в основном гранями пинакоида и призматическими. Является ли



Рис. 19. Схематический разрез вдоль оси Z через кристалл берилла со ступенчатой гранью пинакоида

изученная нами ступенчатая штриховка на гранях пинакоида следствием нарастания слоев на самих этих гранях или на смежных с ними призматических гранях, можно выяснить из схемы рис. 19, где показан разрез параллельно оси Z через кристалл берилла со ступенчатой гранью пинакоида. Схема построена из предположения, что на некоторой ровной площадке пинакоида, будь то грань всего кристалла или отдельного его блока, от одного зародыша начинает развиваться сооружение, разделенное нами на участки. Участки, обозначенные одинаковыми арабскими цифрами, образуются одновременно. Левая граница схемы оборвана, правая же в одинаковой мере может рассматриваться как край основной площадки пинакоида или как край нижнего слоя, прекратившего развитие по каким-либо другим причинам. Высота каждого уступа показана на схеме в несколько раз большей, чем это следовало бы по соотношению с шириной каждой площадки пинакоида, т. е. на схеме вертикальный масштаб во много раз больше горизонтального. Разным уступам в соответствии с наблюдениями придана несколько различная высота. Уступы между соседними террасами пинакоидов для простоты изображены в виде призм, а не косых гранок, хотя уступы могут быть также и косыми. Из схемы видно, что, когда нижний слой закончит свое развитие участком 4, вдогонку ему в незаконченном состоянии успеют развиться еще три слоя, включая слой 4 (конец стадии I). Рост кристалла таким же образом может продолжаться и далее, пока будут сохраняться те же внешние условия, допустим, кончая

образованием начального участка слоя 9 (конец стадии II). При принятой нумерации участков можно сделать два допущения: рост кристалла происходит отложением слоев или параллельно грани пинакоида, или параллельно грани призмы. Дело в том, что уступами ступенек могут быть не только грани призмы, но и косые грани. Выясним, могут ли образоваться косые уступы в случае отложения слоев на грани пинакоида и в случае их нарастания на грани призмы. При этом для каждого случая примем два предположения: что косая грань образуется в конце развития слоя или что такая грань все время сопутствует развитию слоя.

Разберем четыре варианта, изображенных на рис. 20. Здесь линии внутри всех контуров разграничивают последовательные участки предполагаемого непрерывного роста, а стрелки показывают направление роста. Первые два варианта относятся к отложению слоев на грани пинакоида, вторые — на грани призмы.

1. С торца слоя при его развитии продвигается вперед грань призмы при грани пинакоида как грани полного торможения, а косая грань появляется лишь перед окончанием развития слоя как грань полного торможения, в результате чего грань призмы выклинивается (рис. 20, а).

2. Косая грань поддвигается вперед в течение всего периода развития слоя, что вполне возможно, если пинакоид является гранью полного торможения (рис. 20, б).

3. Если предположить, что косая грань образуется как грань полного торможения при окончании развития слоя, параллельного грани призмы (рис. 20, в), то должны были бы наблюдаться случаи значительного или полного выклинивания площадки пинакоида при косой грани как грани полного торможения, а в связи с этим имела бы место большая ширина косых уступов при малой ширине или отсутствии террас пинакоида, чего в действительности не наблюдается.

4. Сделать рациональное построение для варианта постоянного присутствия косой грани при росте слоя на грани призмы (рис. 20, г) невозможно, так как нельзя подобрать необходимую грань полного торможения.

Таким образом, зонарный рисунок на грани пинакоида в нашем случае является следствием ступенчатого нарастания слоев на самой этой грани. Надо полагать, что в разных случаях торцовой поверхностью растущих на грани пинакоида слоев кристалла берилла является гранка призмы или гексагональной дипира-

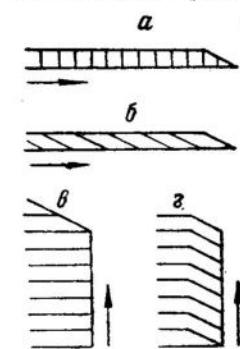


Рис. 20. Доказательство нарастания слоев на грани пинакоида

миды (рис. 9, л) или, наконец, в начале роста слоя — гранка призмы, а в конце роста того же слоя — гранка дипирамиды (рис. 9, а).

Перейдем к соображениям, какими в общих чертах могли быть предположительно условия среды, в которой берилл кристаллизовался с описанными структурными особенностями.

Предварительно заметим, что впадины на гранях, несмотря на то, что на первый взгляд они нередко имеют вид «секущих», нельзя признать за впадины растворения берилла, так как на соседних выступах нигде не наблюдается общего зонарного рисунка, пересеченного впадиной. Наоборот, каждый выступ имеет «свой» зонарный узор, развивающийся нередко навстречу узору соседнего выступа.

О первичном происхождении впадин говорят и особые формы роста боковой поверхности выступов (клины).

В таком случае приходится предположить, что берилл с указанными структурными особенностями развивался из многокомпонентного раствора, включавшего также и растворенные газы, дифференцировавшегося на две неоднородные и, повидимому, несмещающиеся части¹. Одна часть состояла из питательных для кристаллизации берилла компонентов при еще значительной степени их пересыщения, но уже с наличием примесей, а другая часть не была питательной для берилла и содержала, вероятно, компоненты, из которых в более поздние стадии образовались минералы, сопутствующие бериллу. Об этом свидетельствует и неравномерное обрастанье граней берилла слюдой. Судя по формам впадин и вытянутости блоков и выступов, раствор в целом находился в направленном движении и обе дифференцированные части его перемещались в виде струй различной концентрации, касавшихся поверхности растущего кристалла. В результате берилл продолжал рости не на всей площади грани, а лишь на участках, получавших питание. В сторону питательной среды кристалл стал принимать формы, требующие для построения меньше вещества из раствора. Такими формами являются боковые поверхности с участием призм второго рода и дигексагональных, со своеобразным неполным ростом клиньями, с притупляющими косыми гранками. На площадках пинакоида с приближением к непитательной среде призматические торцы слоев переходят в пирамидальные. На мелких питательных участках появляются выступы скелетной формы, изобилующие косыми гранями с зонарными узорами сплошь из косых гранок². Наоборот, на более мелких непитательных участках оста-

¹ В некоторых полостях внутри кристаллов берилла можно наблюдать оптические явления, которые зависят от наличия в этих полостях двух несмещающихся жидкостей.

² Возможные причины образования скелетных форм кристаллов изложены в статье В. А. Мокиевского и С. Н. Семенюк [20].

ются впадинки на площадках выступов. Некоторые из этих впадинок изометрической формы образовались, вероятно, вследствие конденсации на гранях газовых пузырьков, время от времени выделявшихся из питательной части раствора. Непитательная часть раствора, вероятно, обладала свойством адсорбции молекул из питательной части или катализа, так как не только кристаллизация берилла кончается в направлении непитательной части раствора, но также местами в контакте с последней возникают зародыши, развивающиеся в сторону от этой среды. Скорее всего от направленности движущегося раствора зависит неравномерное развитие выступов в противоположных направлениях, а быть может и вытянутая форма блоков.

Надо полагать, что степень пересыщения питательной средой была неодинаковой в разных пунктах, вследствие чего, например, зародыши возникают не вдоль всего шва, а лишь в отдельных точках, а также не вдоль всего края площадок.

Возникает вопрос: почему на большинстве кристаллов берилла нет достаточно заметных ступенчатых структур роста на гранях, в том числе и на гранях пинакоида? Необходимо иметь в виду, что опыты О. М. Аншелева [1, 2], С. В. Банна и Г. Эмметта [21] и других исследователей над ростом кристаллов указывают на то, что толщина слоев роста тем больше, чем более пересыщен минералообразующий раствор. По мере истощения раствора или увеличения содержания в нем примесей слои в большинстве случаев становятся более тонкими и, наконец, перестают быть видимыми даже под микроскопом. Тогда грани представляются не ступенчатыми, а плоскими. Это обычный случай окончания роста кристалла. С этой точки зрения, ступенчатую структуру многие рассматривают как структуру «замороженную», т. е. сохраняющуюся в силу каких-либо необычных условий окончания роста кристалла; например из-за внезапного прекращения циркуляции и поступления питающего кристалл раствора ранее его истощения, что может происходить относительно редко. Поэтому и ступенчатые структуры редки на гранях кристаллов, особенно естественных минералов¹.

Наконец, для многих систем слоев характерно, что самый верхний слой системы образует террасу, в несколько раз более обширную, чем каждая из нижележащих террас. Это можно наблюдать на северном центре кристаллизации блока 9d и многих других центрах кристаллизации рис. 12, на центральной площадке самого крупного выступа рис. 1, а также на фотографии ступенчатой структуры кристалличка цинка (рис. 21), полученного Д. Гейстом путем возгонки [29]. Наличие широкой верхней площадки можно

¹ Интерферометрическим и другими тонкими методами часто обнаруживается субмикроскопическая ступенчатость граней кристаллов.

объяснить тем, что рост кристалла берилла закончился в то время, когда уже прекратилось образование новых слоев видимой толщины, но вместе с тем ранее того момента, когда все нижележащие толстые слои успели бы разрастись в полной мере, т. е. до ликвидации всех ступенек.

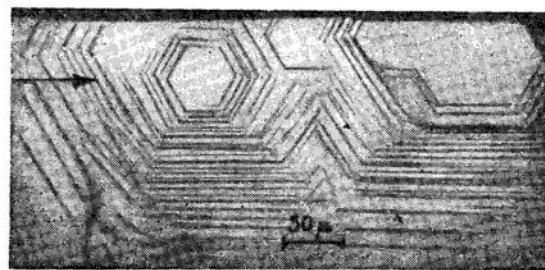


Рис. 21. Поверхность кристалла цинка, полученного возгонкой. Толщина слоев в среднем 0.36μ . Микрофотография по Д. Гейсту. Как и для берилла, входящий угол между слоями двух систем зарастает

V. УТОЛЩЕНИЕ СЛОЕВ РОСТА

Слияние более тонких слоев роста в более толстые наблюдали под микроскопом при выращивании кристаллов из раствора О. М. Аншелес [1], С. В. Банн и Г. Эмметт [21]. О. М. Аншелес наблюдал временную остановку роста того или иного слоя, вследствие чего остановившийся слой настигался вышележащим, т. е. происходило их слияние в один слой. Банн и Эмметт считают, что чем слои ближе к центру кристаллизации, тем они тоньше и растут быстрее более развитых нижележащих, т. е. более толстых слоев. Поэтому тонкими слоями настигается нижележащий более толстый, который таким образом еще более утолщается.

Как следует из этих данных, под утолщением слоев или слиянием двух или нескольких слоев надо понимать слияние их торцовых поверхностей в единый, более широкий торец, образующий более высокий уступ. Слияние слоев может произойти по всему периметру слоев или по части периметра. О слиянии слоев нами получены интересные данные по бериллу.

Как упоминалось выше, наблюдавшиеся кое-где перемычки, соединяющие два смежных зонарных контура, можно объяснить следующим образом. Наличие перемычки доказывает, что мы имеем дело не с двумя, а с тремя слоями, из которых средний не по всему периметру слился с нижним, а верхний также не по всему периметру — со средним. Из рис. 22, где показаны три варианта неполного слияния слоев, следует, что два замкнутых контура не

могут быть соединены между собой только одной перемычкой E_1E_2 . Нередко видимая на зонарном узоре грани берилла между двумя контурами только одна перемычка свидетельствует о том, что имеются не полные шестисторонние контуры, а полушестьсторонники, например, — только по одну сторону линии MN (рис. 22, шов нарастания, край выступа). Перемычки между соседними зонарными контурами при описанных выше тонких еле различимых

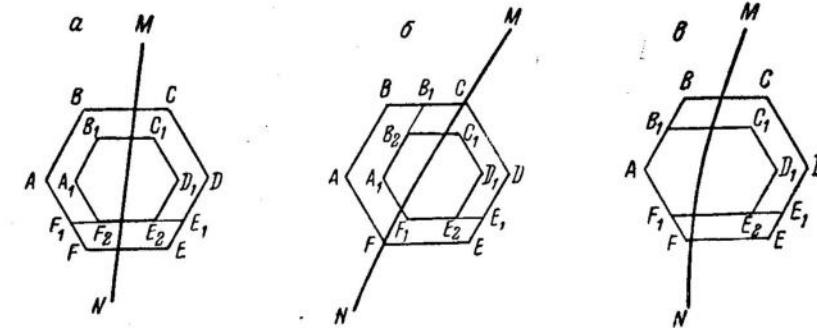


Рис. 22. Расшифровка «перемычек» между контурами слоев роста:

контур нижнего слоя	<i>a</i> $ABCDEF$	<i>б</i> тот же	<i>в</i> тот же
контур среднего слоя	$ABCDE_1F_1$	$A_1B_1CDE_1F_1$	$ABCDE_1F_1$
контур верхнего слоя	$A_1B_1C_1D_1E_2F_2$	$A_1B_1C_1D_1E_2F_1$	$AB_1C_1D_1E_2F_1$

призматических торцах слоев долго являлись загадкой. Можно было только констатировать, что перемычка E_1E_2 всегда тоньше или хуже различима, чем ее продолжение — сторона E_2F_2 или E_2F_1 внутреннего контура. Разгадать сущность перемычек и дать им трактовку, приведенную на рис. 22, удалось после изучения более явных структур слияния слоев на обломочках берилла. Опишем эти структуры.

Рис. 23 представляет собой микрофотографии рельефной группы, состоящей из выступа (в северной части) высотой $0,2 \text{ мм}$, у основания которого свыше 10 зародышей дали начало ряду более или менее разросшихся слоев со ступенчатым понижением преимущественно к югу. На рис. 23, *б*, *в* довольно отчетливо видно, что

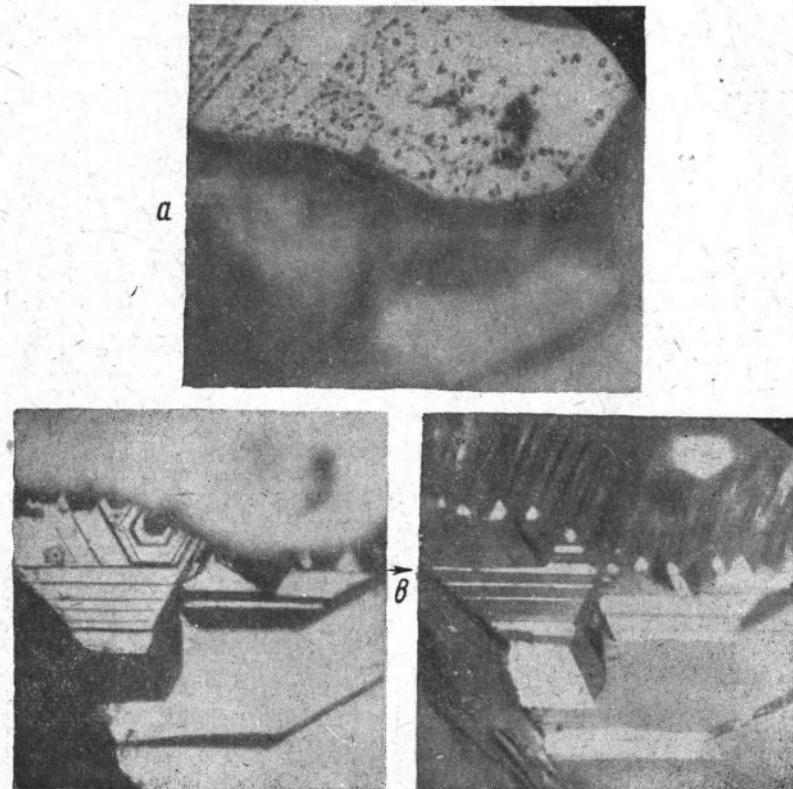


Рис. 23. Утолщение слоев роста:
 а — в фокусе верхняя площадка (пинакоид) призматического выступа;
 б — тубус микроскопа по сравнению с положением а опущен на 0,2 мм. В фокусе скульптурная группа из ступенчатых пинакоидальных террас (светлые) с уступами (черные) из гранок {1011} и местами {1121}. Стрелка указывает на уступ, ступенчато утолщающийся вследствие слияния слоев роста;
 в — поверхность кристалла из положения а наклонена около оси I федоровского столика на 30°; оптической оси микроскопа перпендикулярны торцевые поверхности слоев (белые) — грани {1011}; стрелка указывает на ту же ступенчатую поверхность; хорошо заметны мелкие треугольные гранки (белые) {1011} вблизи центров кристаллизации, расположенных вдоль основания призматического выступа тонкоребристого строения.
 Микрофотография в отраженном свете на федоровском столике. $\times 60$

толщина торцовой поверхности, помеченной стрелкой, не является постоянной, а увеличивается к востоку в 5 раз (с 0,004 до 0,02 мм), причем не постепенно, а ступенчато, что происходит от слияния передних (южных) торцов нескольких соседних слоев. При этом нижнее ребро каждого верхнего торца в точности совмещается с верхним ребром каждого нижележащего слоя, входящий угол ликвидируется и общий торец образует идеальную плоскость.

а

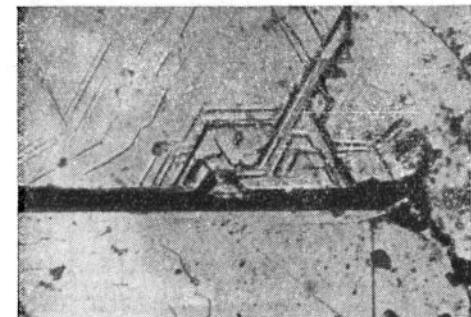
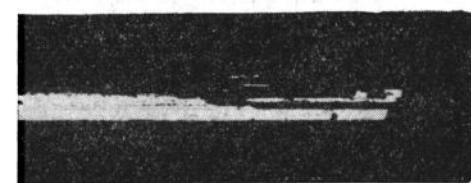


Рис. 24. Утолщение слоев роста:
 а — площадка ступенчатого пинакоида (серая) и довольно широкий уступ (черный), являющийся гранией {1011}; посередине полушестисторонняя выемка — следствие отставания развития нескольких тонких слоев. Белые пятна — внутренние рефлексы; б — поверхность кристалла наклонена около оси I федоровского столика на 30°; освещена торцовая поверхность {1011}, причем эта поверхность тоньше на том интервале, где рост налегающих слоев отстает. Микрофотография в отраженном свете на федоровском столике. $\times 60$

б



Иногда какой-либо верхний слой несколько отстает от нижележащего, но не было случая, чтобы верхний слой нависал над нижним (т. е. опережал его).

На рис. 23, б призародышевые участки образуют черные шестисторонние площадочки, образованные гранями r . Каждая передняя из этих граней в виде мелкого белого треугольничка видна на рис. 23, в. Такие пирамидки несомненно образованы утолщением слоев с торцами r вплоть до полного зарастания площадки c . На рис. 1 и 12 таких пирамидок с вершинами вблизи центров кристаллизации не наблюдалось вовсе, что еще раз подтверждает, что там слои роста на грани c имеют торцы не косые, а призматические, т. е. такие, при слиянии которых их проекции на плоскость c не становятся шире, а верхняя часть системы слоев остается увенчанной площадкой c , а не гексагональной пирамидкой.

Еще одно доказательство слияния многих слоев воедино приведено на рис. 24. Это обнаруживается вследствие отставания нескольких налегающих более тонких слоев на части периметра

толстого слоя (в средней части снимка). Торцы отставших слоев образуют выемку с углами в 120° , обращенную выпуклостью в сторону, обратную росту слоев. На ингервале, где налагающие слои отстают в росте, торец толстого слоя менее широк.

Таким образом, при утолщении слоев (например, с террасой с и торцом p) получается очень оригинальное положение: разрастание торца p ограничивается террасой c как плоскостью полного торможения, а в конечном счете разрастание грани c ограничивается плоскостью p как гранью полного торможения.

Приведенные данные об утолщении слоев дают полное основание считать, что между торцом тонкого слоя и макроскопически видимой гранью кристалла нет принципиальной разницы: грань образуется путем слияния торцов многих слоев. Так, на рис. 23 тончайшие видимые слои имеют толщину всего 0,001 мм, а наиболее широкая гранка p соответствует уже толщине слоя 0,1 мм. На рис. 24 толстый слой имеет толщину уже около 0,07 мм. Это показывает, что от тонких ступенчатых структур вполне возможен переход к группам сросшихся мелких ступенчато расположенных кристалликов и к одиночным крупным кристаллам, к чему имеются следующие данные.

На втором конце (со стороны другого пинакоида) того же кристалла (см. рис. 12) наблюдаются целые группы мелких кристалликов, расположенных ступенчато друг к другу. Кристаллики имеют огранку из граней призм, гладких или с мелкой структурой и пинакоида, сплошь и рядом ступенчатого. Имеются и косые притупляющие гранки. Не трудно создать картину взаимного расположения подобных кристалликов, если представить себе площадку рис. 12, на которой во много раз увеличено превышение каждого кристаллического блока над другим.

Сходство между ступенчатым расположением групп кристалликов, связанных общностью роста, и структурой блоков, приведенных на рис. 12, выражается в следующем: 1) скульптурная группа состоит из кристалликов более ранних и более поздних, зарождающихся каждый от нескольких центров кристаллизации у основания ранних кристалликов; 2) каждый кристаллик образуется слиянием частей от нескольких зародышей; 3) некоторые кристаллики образуются не у основания более ранних, а изолированно от них, и тогда в промежутках возникают кристаллики от центров, расположенных с разных сторон и развивающихся навстречу. Указанное сходство настолько велико, что уместен вопрос: не происходит ли площадки, состоящие из блоков с ничтожным превышением одного блока над другим, от группы последовательно зародившихся ступенчато расположенных кристалликов? Для этого необходимо только, чтобы позднее зародившиеся кристаллики почти полностью догнали в своем росте по оси Z более ранние кристаллики или чтобы последние возникли немногим ранее первых.

Независимо от ответа на данный вопрос ясно то, что принципы зарождения и развития блоков, состоящих из систем слоев, с одной стороны, и кристаллических параллельных сростков, с другой, — одни и те же.

В группе кристалликов, связанных последовательностью времени образования, был найден наиболее высокий, т. е. наиболее ранний, кристаллик с целью выяснить, где возникают на нем зародыши. Три-четыре зародыша были обнаружены на комбинационных ребрах призм с пинакоидом близко от вершин. Зонарный рисунок развивался от этих ребер к середине грани пинакоида.

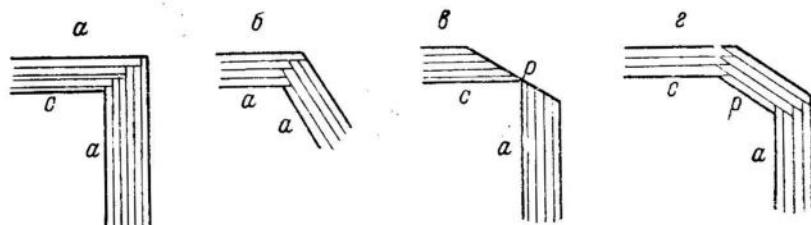


Рис. 25. Развитие грани из боковых поверхностей слоев роста

Перейдем теперь к некоторым соображениям о послойном росте одиночных кристаллов берилла. Ступенчатая структура, отражающая послойный рост, была изучена нами на гранях пинакоида этого минерала. Но по аналогии с другими минералами, а также по другим данным о берилле слоистый рост свойствен и граням призм берилла. Иначе и невозможно себе представить рост кристалла вширь, т. е. с разрастанием не только граней призм, но и пинакоида. Что же необходимо для такого всестороннего роста, если считать, что вышележащие слои обычно не нависают над нижележащими? Учитывая наши данные об утолщении слоев и образовании граней путем слияния воссюю торцов смежных слоев, для всестороннего роста необходимо, чтобы каждые две смежные грани A и B кристалла образовывались слоями с тем условием, что торцом слоя на грани A будет являться гранка B и наоборот.

Для берилла с гранями c и a (рис. 25, а) торцами слоев на грани c должны быть гранка a , а торцами слоев на каждой грани a — гранки c (в сторону грани c) и a (в сторону смежных граней a , рис. 25, б). Тогда грани a и c будут разрастаться. Это имеет место при росте кристаллов берилла данного типа, исключая небольшой последний этап роста, когда иногда появляются косые притупляющие грани. Косые грани, как указано выше, образуются слиянием таких слоев на грани пинакоида, торцами которых являются косые гранки того же символа (p или s), в результате чего грань c должна зарастать. Надо полагать, что слои

с дипирамидальными торцами могут при тех же условиях образовываться и на гранях призм (рис. 25, в). В таком случае не только грань *c*, но и грань *a* будет зарастать, а косые грани разрастаться. Вероятно, косые грани появляются при изменении состава раствора, питающего рост берилла, быть может, в связи с увеличением содержания примесей. Известно, что в подобных условиях могут происходить такие изменения габитуса кристаллов, при которых в результате торможения одних граней появляются другие [19; 21, Сб. II, стр. 10, 41, 82]. Наблюдения над ступенчатыми структурами берилла и некоторые другие позволяют считать обоснованным, что аналогичный процесс изменения символа может иметь место и для растущего торца слоя.

Остается не вполне ясным, может ли происходить нарастание слоев и на косых гранях. Повидимому и в этом нет ничего невозможного при некоторых составах минералообразующего раствора¹. Чтобы и в этом случае смежные грани могли разрастаться, требуется соблюдение изложенного выше принципа, т. е. необходимо, чтобы символ торца слоя на каждой грани соответствовал символу смежной грани (рис. 25, г). Но такой принцип, вероятно, не единственный. При другом варианте грани, повидимому, может разрастаться как грань полного торможения (подобно шву нарастания, обрывающему рост системы слоев), и тогда разрастание грани может происходить независимо от того, каков символ торца слоя на смежной грани.

Данные относительно развития граней вследствие отложения слоев на смежных гранях хорошо объясняют происхождение клина (рис. 9) путем отложения серии слоев на боковой грани выступа с точкой зарождения слоев у подошвы выступа.

Согласно приведенным соображениям, основанным на изучении структур утолщения слоев, для роста слоев на гранях кристалла необходимо наличие входящего угла. При этом не обязательно, чтобы торец растущих слоев был гранкой со сложным индексом, как это предполагают С. В. Бани, Г. Эмметт [21] и О. М. Аншелес [2], хотя из их фактических материалов, особенно последнего, это не вытекает. Так, О. М. Аншелес приводит данные о том, что у пирита на ступенчатых гранях пентагон-додекаэдра {210} бывают уступы куба {100} и наоборот. Г. Кальб [32] указывает на уступы ромбо-додекаэдра {110} на ступенчатых гранях октаэдра {111} магнетита и наоборот. Следовательно, плоскость с одними и теми же индексами, в том числе и простыми, может быть и террасой рас-

¹ Приводимый А. В. Шубниковым рисунок зонарной структуры турмалина наглядно указывает на то, что новая грань на кристалле образуется как грань полного торможения, а в дальнейшем такая грань может сначала увеличиваться в размере опять-таки как грань полного торможения, т. е. вначале без нарастания, а затем и с нарастанием слоев [25, рис. 53].

тущего слоя и (на других гранях или в иных условиях) его торцовской растущей гранкой. Торцовую же растущую гранку может иметь самые простые индексы вплоть до куба у слоев на грани куба.

Вероятно, торцы со сложными индексами образуются на слоях роста вместо торцов с более простыми индексами незадолго до окончания кристаллизации, когда создаются условия среды, при которых возможен рост слоев только этого типа, т. е. со сложными индексами торцов. Доказательством изменения индексов одного и того же слоя в процессе его роста является наблюдение О. М. Аншелеса [2] на гранях куба {100} пирита. Боковые стенки ступенек на этих гранях были образованы комбинацией плоскостей пентагон-додекаэдра {210} и ромбо-додекаэдра {110}. Ясно, что слой с двумя торцовыми гранками без торможения одной из них по другой рости на может. Следовательно, наличие двух гранок на торце слоя может иметь место только в переходный этап, в течение которого ранее свойственная слою торцовская гранка с одними индексами выклинивается по образующейся торцовой грани другого индекса, после чего уже только эта последняя гранка остается свойственной торцу слоя, продолжающего развиваться (рис. 20, а, б).

Возможно, правда, и другое толкование: слой с двумя торцовыми гранками мог образоваться путем слияния более тонких слоев, из которых нижние имели торцевые поверхности с одними индексами, а верхние — с другими.

Из всего сказанного в данной главе, можно сделать следующие выводы.

Слияние двух смежных слоев, растущих на грани, может произойти или при остановке роста нижнего слоя, или при более быстром росте верхнего слоя. Слияние слоев приводит к их утолщению и образованию их боковыми поверхностями кристаллических граней. Следовательно, для развития смежных граней кристалла необходимо, чтобы символ торцовой поверхности слоя на каждой грани был таким же, как и символ смежной грани (этот принцип не единственно возможный). В зависимости от такого изменения условий среды, которое приводит к появлению новых граней на растущем кристалле, должно происходить также и изменение символов растущих слоев.

VI. НЕКОТОРЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОСТРОЕНИЯ

Излагаемые геометрические построения позволяют сравнить, как должно было бы происходить развитие некоторых частей кристалла при предполагаемых более простых геометрических условиях роста и как оно происходит в действительности. При этом выявляются некоторые детали закономерностей роста кристалла.

1. Разрастание правильных шестиугольников

Допустим внутри плоского правильного шестиугольного контура $ABCDEF$ (рис. 26) начинают с равной скоростью разрастаться от случайно расположенных точек плоские правильные шестиугольники, ориентированные параллельно друг другу и по отношению к основному контуру. В момент смыкания (встречи) каких-либо двух шестиугольников соответствующие стороны их

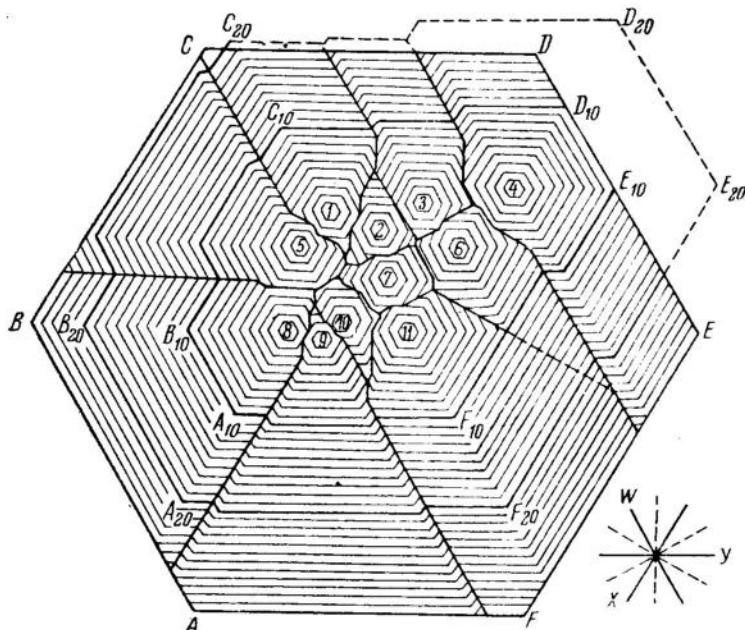


Рис. 26. Разрастание правильных шестиугольников

образуют входящие углы 60° с биссектрисами, которые назовем швами срастания, перпендикулярными одной из сторон шестиугольников или, что то же, одной из осей X , Y или W . В частном случае, когда центры двух шестиугольников лежат на одной линии, перпендикулярной одной из осей, шестиугольники смыкаются под углом 120° (например, шестиугольники 2 и 3, 9 и 10). При дальнейшем достаточном разрастании шестиугольников входящие углы 60° не сохраняются. В частном случае, когда центры шестиугольников лежат на одной прямой, параллельной какой-либо из осей (например, для шестиугольников 6 и 11), входящие углы 60° застают, а вообще они преобразуются в углы по 120° . Биссектрисами всех углов 120° являются прямые линии, параллельные одной из осей. Таким образом, при достаточном разраст-

нии шестиугольников исчезают входящие углы по 60° , а с ними и швы срастания, перпендикулярные осям; сохраняются только входящие углы 120° , а с ними и швы срастания, параллельные осям.

Шестиугольники, не являющиеся периферическими (обозначенные цифрами 2, 7 и 10), превращаются в многоугольники и выклиниваются (зарастают). Если считать, что стороны основного шестиугольника $ABCDEF$ являются сторонами первого рода, то выклинившиеся многоугольники ограничены сторонами (швами срастания) первого и второго рода, т. е. параллельными и перпендикулярными осям. Наружные стороны периферических многоугольников являются сторонами только первого рода. Их можно подразделить на две группы: стороны, прилегающие к швам и не прилегающие. Прилегающие стороны по размерам не увеличиваются, а составленные ими входящие углы не зарастают. Стороны, не прилегающие к швам, разрастаются от зоны к зоне, оставаясь равными между собой в одной и той же зоне. Сколько бы ни было начальных центров, разрастающихся сторон всего только шесть. При таких условиях (т. е. когда разрастаются только шесть сторон и каждый раз равны между собой, а все остальные стороны не разрастаются) по мере разрастания сросток-многоугольник все более приближается к изометричной форме правильного шестиугольника: стороны при швах, оставаясь абсолютно того же размера, становятся относительно меньшими. В пределе при бесконечно больших размерах многоугольника он стремится к форме правильного шестиугольника. Параллельные швы при этом сливаются, пересекаются в одной точке (центр шестиугольника в пределе) и занимают положение осей X , Y и W . Увеличение степени изометричности фигуры можно видеть хотя бы из сравнения соотношения длин ступенчатых сторон, измеренных для десятой и двадцатой зоны роста (рис. 26) и вычисленных для сотой и двухсотой зоны (табл. 1).

Если допустить разные скорости разрастания каждого шестиугольника, то входящие углы 120° также сохраняются, а шов срастания отклоняется к стороне входящего угла, растущей медленнее (рис. 27). При этом величина угла α между швом срастания CF и стороной CD , растущей медленнее, находится в следующей зависимости от скоростей роста соторон¹:

Таблица 1

Номер зоны	AB	BC	CD	DE	EF	FA
10	1,0	2,3	2,9	1,0	2,8	2,2
20	1,0	1,65	1,95	1,0	1,9	1,6
100	1,0	1,13	1,19	1,0	1,18	1,12
200	1,0	1,07	1,10	1,0	1,09	1,06

¹ Вывод всех формул не приводится.

$$\sin \alpha = \frac{v_1 \sqrt{3(v_2^2 - v_2 v_1 + v_1^2)}}{2(v_2^2 - v_2 v_1 + v_1^2)}, \quad (1)$$

где v_1 — скорость роста стороны CD , растущей медленнее;
 v_2 — скорость роста стороны CB , растущей быстрее.

Если принять скорости роста сторон CD и CB входящего угла 120° соответственно равными 1 и v , то

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{3(v^2 - v + 1)}{2(v^2 - v + 1)}}. \quad (2)$$

Угол α по формуле (2)

при $v = 1$	равен 60°
» $v = 2$	» 30°
» $v = 3$	» 19°
» $v = \infty$	» 0°

При $v > 3$ (от 4 до 10 и более) отношение угла α к углу $120^\circ - \alpha$ (т. е. углу между швом срастания CF и стороной CB , растущей быстрее) составляет приближенно $1:2v^*$.

Можно было бы разработать геометрические схемы и для вариантов неодновременного возникновения шестисторонников при равных или не равных скоростях их роста, а также для разрастания не плоских фигур, а полиэдров. Однако для дальнейших выводов в этом нет необходимости. Но есть необходимость в анализе ускоренного и замедленного зарастания стороны, образующих входящие углы 120° и 60° , по сравнению со скоростью роста сторон AB и DE , смежных со сторонами входящего угла (рис. 28 и 29), и в нахождении некоторых параметров, по которым можно было бы простыми приемами судить о степени ускоренного или замедленного зарастания входящих углов.

Рис. 27. Построение для вывода подсобной формулы (2)

нахождении некоторых параметров, по которым можно было бы простыми приемами судить о степени ускоренного или замедленного зарастания входящих углов.

* Формулы (1) и (2) выражают также зависимость между углом α и скоростями роста смежных сторон одного и того же шестисторонника.

2. Зарастание входящих углов 120° и 60°

Пусть стороны BC и CD входящего угла BCD (рис. 28), равного 120° , развиваются со скоростью v при развитии смежных с ними сторон AB и DE со скоростью, равной 1. Пусть при этом зарастание входящего угла BCD произойдет в точке G . В этом положении вместо ломаной линии $ABCDE$ получим контур FGH .

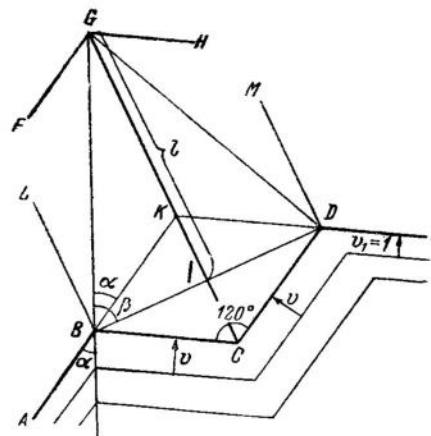


Рис. 28. Построение для вывода уравнения (6) относительной скорости зарастания входящего угла 120°

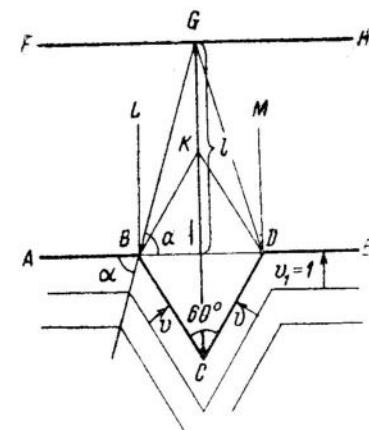


Рис. 29. Построение для вывода уравнения (9) относительной скорости зарастания входящего угла 60°

Прямые линии BG , CG и DG являются в этом случае следами перемещения точек B , C и D . Нас интересует зависимость между скоростью v развития сторон входящего угла и длиной отрезка IG , характеризующего интервал зарастания от основания BD треугольника BCD , построенного на сторонах входящего угла, до точки зарастания G . Обозначим величиной l длину отрезка, выраженную в долях высоты CI треугольника BCD , т. е. $l = \frac{IG}{CI}$.

Эта величина выражает степень вытянутости интервала зарастания входящего угла. Угол α имеет то же значение, что и в уравнениях (1) и (2). Положение угла β видно из чертежа.

Зависимость между величинами l , β и α следующая:

$$l = \sqrt{3} \operatorname{tg} \beta; \quad (3)$$

$$\beta = \alpha + 30^\circ. \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (3) значение угла β из уравнения (4) и пользуясь зависимостью между углом α и скоростью v по уравнению (2), получаем

$$l = \frac{v+1}{v-1} \quad (5)$$

и обратно

$$v = \frac{l+1}{l-1}. \quad (6)$$

Таким образом, измерив высоту треугольника, построенного на сторонах входящего угла, и длину отрезка до точки застания входящего угла, можно по уравнению (6) вычислить относительную скорость роста сторон застывающего входящего угла 120° .

Некоторые значения v в зависимости от l для входящего угла 120° приведены в табл. 2.

Таблица 2

l	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
v	∞	21,0	11,0	7,67	6,0	5,0	4,33	3,86	3,5	3,22	3,0

Величина l не может быть менее 1, так как при подобном допущении стороны AB и DE вместо роста должны подвигаться вспять.

Даже при максимальном значении $l = \infty$ скорость v равна лишь 1, т. е. если входящий угол застывает, то скорость роста составляющих его сторон всегда заведомо больше скорости роста смежных с ними сторон AB и DE .

Итак, пределами застивания входящего угла 120° являются два крайних положения: от совпадения линии BG с линией BK ($\alpha=0^\circ$, $\beta=30^\circ$, $BCDK$ — ромб) до совпадения ее с линией BL ($\alpha=60^\circ$, $\beta=90^\circ$, $BL||IG$). При $\beta=90^\circ$ стороны входящего угла BCD остаются неизменными, а при $\beta > 90^\circ$ угол BCD не только не застывает, но разрастается.

Выведем аналогичные формулы для входящего угла BCD , равного 60° (рис. 29). И в данном случае будем считать, что стороны BC и CD входящего угла развиваются со скоростью v при развитии смежных с ними сторон AB и DE со скоростью, равной 1. При этом застивание входящего угла BCD произойдет в некоторой точке G , и в последнем положении ломаный контур $ABCDE$ преобразуется в прямую линию FGH . Попрежнему обозначим через l отношение $\frac{IG}{CI}$, характеризующее степень вытянутости интервала застивания входящего угла. Угол α имеет прежнее значение.

Зависимость между l и α следующая

$$l = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{3}}. \quad (7)$$

Подставляя в уравнение (7) вместо величины угла α ее значение из уравнения (2) в скорости v , находим

$$l = \frac{1}{2v-1} \quad (8)$$

и обратно

$$v = \frac{1+l}{2l}. \quad (9)$$

Как видно, приведенные формулы позволяют на основании простых измерений вычислять скорость роста сторон застывающего входящего угла 60° .

Некоторые значения v в зависимости от l для входящего угла 60° приведены в табл. 3.

Таблица 3

l	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	10,0	∞
v	∞	5,5	3,0	2,17	1,75	1,50	1,33	1,21	1,13	1,05	1,0	0,75	0,67	0,63	0,60	0,55	0,50

Величина l не может быть отрицательной, так как в этом случае и скорость роста сторон AB и DE была бы отрицательной.

При $l=1$ входящий угол будет застывать при одинаковой скорости сторон BC и CD входящего угла и смежных с ними сторон AB и DE ($\alpha=60^\circ$, $BCDK$ — ромб).

Даже при максимальном значении $l=\infty$ скорость роста сторон входящего угла v равна лишь 0,5, что является пределом застивания входящего угла 60° . В этом случае линия BG совпадает с линией BL ($\alpha=90^\circ$). Вторым пределом застивания входящего угла является положение совпадения линии BG с линией BI ($\alpha=0^\circ$). При $\alpha=90^\circ$ входящий угол BCD остается неизменным, а при $\alpha > 90^\circ$ не только не застывает, но разрастается.

Мы разобрали два варианта застивания входящих углов: 1) застивание угла при разных скоростях роста составляющих его сторон BC и CD , но при равной скорости роста каждой стороны входящего угла и стороны, с нею смежной (скорости роста сторон AB и BC равны, то же CD и DE , рис. 27); 2) застивание углов при равной скорости роста составляющих его сторон BC и CD , причем скорости роста сторон AB и DE , с ними смежных,

равны между собой, но не равны скорости роста сторон входящего угла (рис. 28 и 29).

Разберем третий вариант зарастания входящих углов.

Пусть скорости роста сторон BC и CD входящего угла 60° (рис. 30) не равны скоростям роста смежных с ними сторон AB и DE , но при этом скорости роста двух последних одинаковы. Точкой зарастания входящего угла BCD пусть является не точка G , а точка G_1 , не лежащая на биссектрисе CG входящего угла.

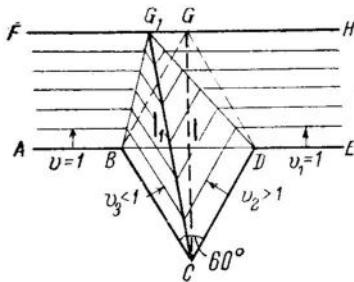


Рис. 30. Одни из случаев «асимметричного» зарастания входящего угла 60°

случаев — замедленного и ускоренного зарастания входящего угла, т. е. величину отрезка IG уменьшить ($l < 1$) или увеличить ($l > 1$), то можно убедиться, что при неизменной скорости v_1 скорости роста v_2 и v_3 сторон входящего угла хотя и изменяются, но останутся неравными между собой. Таким образом, третий вариант во всех случаях является вариантом зарастания входящего угла при разных скоростях роста сторон, составляющих угол. При этом ни одна из этих скоростей не равна скоростям роста смежных с ними сторон, а скорости роста последних равны между собой.

Аналогичное построение третьего варианта для таких же трех случаев можно сделать и для входящего угла 120° . Построением получим тот же вывод, что и для угла 60° : если шов зарастания входящего угла не является его биссектрисой, а скорости роста сторон, смежных со сторонами входящего угла, равны между собой, то скорости роста сторон входящего угла не равны между собой.

Из всех выведенных выше основными являются формулы (6) и (9). Они служат для определения относительной скорости зарастания входящих углов, образующихся как при срастании систем слоев, так и на группе смежных зонарных линий.

¹ Зарастанию входящего угла при одинаковой скорости роста сторон угла и смежных с ними сторон.

Определение указанной скорости не является конечной целью. Оно позволит перейти к существующим соображениям о механизме роста кристалла.

Для определения относительной скорости зарастания входящего угла необходимо проделать несложные операции (рис. 28 и 29):

1) отыскать на зарисовке (или на фотографии) проекции поверхности кристалла точку G зарастания входящего угла;

2) построить четырехугольник $BCDG$ со сторонами входящего угла и одной из вершин в точке зарастания G ;

3) провести диагонали полученного четырехугольника;

4) измерить длину каждой полуdiagонали CI и IG , составляющих ту диагональ CG , которая является швом срастания сторон BC и CD входящего угла;

5) вычислить величину l , являющуюся отношением $\frac{IG}{CI}$, т. е.

отношением полуdiagонали IG , примыкающей к точке зарастания G , к полуdiagонали CI , примыкающей к вершине C входящего угла;

6) в зависимости от величины входящего угла (120 или 60°) по одной из формул (6) или (9), зная l (степень вытянутости четырехугольника), вычислить относительную скорость v зарастания входящего угла ¹.

Задача еще более упрощается, если не задаваться целью достаточно точно определить относительную скорость зарастания входящего угла, а только выяснить, какого рода происходит зарастание — нормальное, замедленное или ускоренное. Для этого в случае входящего угла 60° (рис. 29) достаточно, отыскав точку G зарастания входящего угла, построить четырехугольник $BCDG$ со сторонами входящего угла и одной из вершин в точке зарастания G . Форма четырехугольника в виде ромба $BCDK$ будет свидетельствовать о нормальном зарастании входящего угла, более сплюснутая форма (от ромба до треугольника BCD) — об ускоренном зарастании и, наконец, более вытянутая форма (например, $BCDG$) — о замедленном зарастании входящего угла по сравнению со скоростью роста сторон, смежных со сторонами входящего угла.

Для входящего же угла 120° (рис. 28) форма ромба $BCDK$ свидетельствует о бесконечно большой относительной скорости зарастания входящего угла (стороны, смежные со сторонами входящего угла, являются сторонами полного торможения), форма более сплюснутая вообще невозможна, а более вытянутая форма четырехугольника (например, $BCDG$) указывает все же на уско-

¹ Можно воспользоваться вычисленными значениями v , приведенными в табл. 2 и 3.

ренное зарастание, так как при нормальной скорости входящий угол должен оставаться неизменным.

Таким образом, разобранные геометрические построения приводят к следующим результатам:

1. При разрастании с равной скоростью параллельно расположенных правильных шестисторонников, одновременно возникающих в произвольных точках на плоскости, один из этих фигур выклиниваются, другие выживают. В пределе контур всего сростка стремится к форме правильного шестисторонника.

При допущении разных скоростей развития двух смежных шестисторонников получаем вспомогательную формулу (2), необходимую для дальнейших геометрических построений — вывода формул (6), (9) и др.

2. Для анализа деталей комплексного роста кристаллов служат в основном уравнения (6) и (9), позволяющие определять относительную скорость зарастания входящих углов 120° и 60°, т. е. анализировать явления, наблюдаемые при развитии систем слоев и их групп, находящихся между собой во взаимодействии. Этой же цели служит и построение рис. 30.

Перейдем к рассмотрению явлений роста кристаллов берилла в свете выполненных геометрических построений.

VII. ЗАКОНОМЕРНОСТИ СРАСТАНИЯ СИСТЕМ СЛОЕВ И ЗАРАСТАНИЯ ДЕФЕКТОВ СЛОЕВЫХ ЛИНИЙ

1. Срастание систем слоев

Геометрический анализ равномерного разрастания правильных шестисторонников (см. рис. 26) позволил выяснить, что шестисторонники после срастания принимают форму многоугольников. Многоугольники разделены швами срастания, имеющими определенную ориентировку. По мере дальнейшего разрастания образующийся сросток в целом все более приближается к изометричной форме правильного шестисторонника, несмотря на то, что дефекты срастания в виде входящих углов 120° между сросшимися частями остаются неизменными.

Сравним эти данные с тем, что имеет место в действительности при строении берилла из систем слоев.

Как указано выше, блок нередко состоит из двух или нескольких сросшихся систем слоев. Каждая система развилась от своего центра кристаллизации. На границе срастания систем слоев фактически не наблюдается швов срастаний. Таким образом, швы срастания, это — лишь построенные линии. Реально швы получаются не при срастании, а при нарастании и, следовательно, разграничивают не части одного блока, а один блок от другого.

Для внутренних частей блока еще в большей мере, чем при разобранной схеме разрастания шестисторонников, характерна тенденция к образованию изометрических контуров. При разрастании каждой системы продолговатых слоев в отдельности и при срастании двух или нескольких систем слоев одного и того же блока контуры периферических зон становятся все более изометрическими по сравнению с контурами внутренних зон. При смыкании и дальнейшем разрастании систем слоев одного и того же блока довольно быстро застают все входящие углы, в том числе и углы 120° (чего не наблюдалось на схеме разрастания шестисторонников, рис. 26). Очевидно, стороны при входящих углах растут быстрее остальных¹.

Займемся подробнее анализом срастания систем слоев.

На рис. 31 изображено несколько случаев, когда в одном и том же блоке у шва нарастания развиваются из зародышей две системы слоев, которые по мере развития в некоторый момент смыкаются с образованием входящего угла, а затем срастаются: входящий угол застает и образуется единый зонарный контур. Несколько деталей этого явления изображено на рис. 31, а, б, в, г, причем на рис. 31, а, б и в (для двух северных систем) образующийся выходящий угол 60° быстро преобразуется в угол 120°, который затем застает, а на рис. 31, в (для двух южных систем) и 31, г представлены частные случаи, когда входящий угол 60° застает без преобразования в угол 120°*.

Явление срастания систем слоев можно видеть также на микрофотографии (рис. 32), на которой зафиксирована та же деталь, что и на зарисовке рис. 31, в.

На всех этих рисунках относительными размерами выделяется площадка нижележащего общего слоя, ближайшего к сомкнувшимся системам. Эта площадка имеет ромбовидный контур или заметную ширину. Приближенная концентричность зон каждой системы не только между собой, но и с объемлющими общими зонами (за исключением, разумеется, района срастания) является доказательством образования нижележащих общих слоев путем срастания каждой примерно равновысотной пары слоев смежных систем. В противном случае, т. е. в случае возникновения зародышей на некоторой общей основе, они имели бы произвольное положение на шве нарастания. Слоевые же линии отдельных систем при развитии притыкались бы к зонарному контуру основной площадки, чего почти нигде не наблюдается. Следовательно, каждый нижележащий слой при развитии примерно повторил те

¹ М. А. Толстопятов приводит рисунок сростка из нескольких шестиугольников, который, благодаря застанию входящих углов приобретает общий шестиугольный контур [23, стр. 35]. Рисунок, вероятно, относится к грани пинаконда берилла. Пояснений к нему автор не дает.

* Этот частный случай разобран выше (рис. 26, шестисторонники б и II).

контуры, которые свойственны вышележащим слоям. Если бы развитие слоев продолжалось, то каждый внутренний контур, постепенно развиваясь, последовательно занимал бы положение

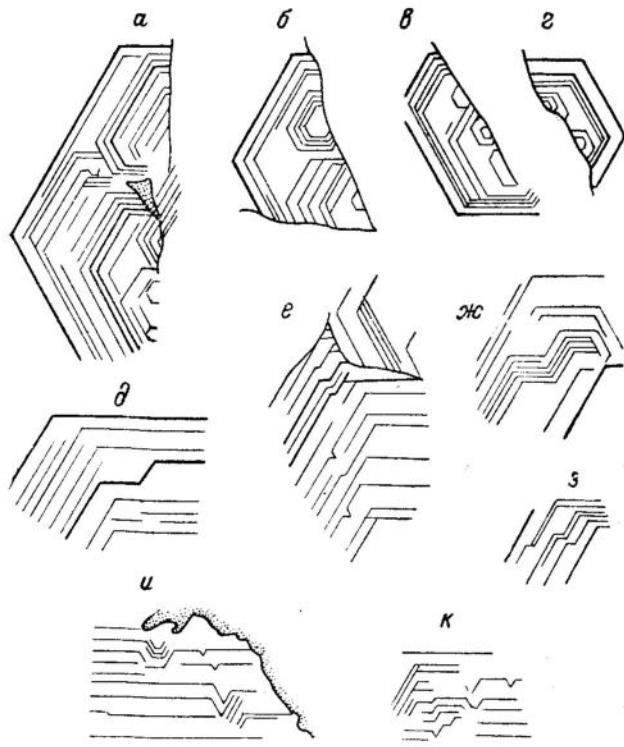


Рис. 31. Срастание блоков из систем слоев (*a—g*) и зарастание дефектов слоев (*d—k*). Детали к рис. 12.
×30

периферических контуров, сначала раздельных для каждой системы, а затем общих¹.

После смыкания систем слоев зарастание входящих углов происходит ускоренными темпами. Скорость v роста сторон при входящих углах по сравнению со скоростью роста других сторон систем слоев можно выяснить, определив величину параметра l и пользуясь формулами (6) и (9). Из рис. 31, *a*, *b*, *v* ясно, что, определяя параметр l при срастании под углом 120° , приходится считаться с тем (табл. 4), что этот угол образовался из угла 60° , а при срастании под углом 60° (рис. 31, *v*, *g*) можно определить

¹ Повторение или совпадение контуров, разумеется, надо понимать не в пространстве, а в ортогональной проекции на плоскость пинакоида.

не самую точку зарастания входящего угла, а лишь ее предельное возможное положение на ближайшем общем зонарном кон-



Рис. 32. Срастание систем слоев на грани ступенчатого пинакоида (серые участки). Очертания слоев роста — концентрические черные линии, швы нарастания — одиночные линии, по одну сторону от которых разрастаются зародыши слоев. Микрофотография в отраженном свете. ×56

туре. Невозможность точного определения параметра l обусловлена недостаточным количеством промежуточных контуров.

Таблица 4

Номер рисунка	l	v	Примечание
Для углов 120°			
31, <i>a</i>	1,27	8,5	
31, <i>b</i>	1,36—1,20	6,5—10,0	
31, <i>v</i>	1,90—1,82	3,2—3,4	
Для углов 60°			
31, <i>v</i>	<1,25	>0,9	$v >>> 0,9?$
31, <i>g</i>	<0,67	>1,25	$v >>> 1,25?$
21	0,71	1,2	v определяется довольно точно, ввиду наличия частых зонарных линий

Итак, зарастание входящих углов при срастании систем слоев происходит всегда ускоренным образом, что соответствует выво-

дам теории Косселя-Странского¹. Каждый отдельный слой разрастается при наличии двугранного угла между уступом слоя и нижележащей террасой. При срастании же слоев двух серий образуется трехгранный угол — между уступами двух слоев и нижней площадкой, что, по Странскому, способствует росту в большей степени, чем наличие двугранного угла². Несмотря на относительную приближенность, скорости, вычисленные в табл. 4, позволяют судить о том, что, повидимому, для берилла как кристалла гексагональной сингонии, входящие углы 120° зарастают более ускоренно ($v = 3-10$), чем углы 60° ($v = 1,2$).

Остановимся еще на одной детали смыкания систем слоев. На рис. 14 изображено смыкание двух систем слоев (частей 12b и 12c блока 12, рис. 12, а, б), поникающих навстречу друг другу, о чем свидетельствует положение светлых полосок. Белая полоска вдоль линии смыкания обеих систем указывает на то, что из сомкнувшихся левый слой выше правого, т. е. по линии смыкания имеется двугранный угол. Иначе и быть не может, так как, если бы на месте смыкания не было двугранного угла, не было бы видно никакой черной линии. Но возникает вопрос: почему при наличии двугранного угла по линии смыкания двух систем слоев левый, т. е. более высокий, слой, не продолжает развиваться дальше, не покрывает своей верхней частью примыкающий к нему более низкий слой правой системы, как это следовало бы ожидать по теории Косселя-Странского? Повидимому потому, что в момент смыкания слоев у обоих концов линии смыкания образуются еще и трехгранные углы, настолько благоприятные (по теории Косселя-Странского) для ускоренного зарастания, что частицы растворенного вещества устремляются именно в трехгранные углы. При этом полностью прекращается диффузия частиц к двугральному углу.

Необходимо заметить, что одной упомянутой теории Косселя-Странского недостаточно для объяснения рассмотренных явлений срастания слоев. Ниже будет указано, что отличает механизм реального роста кристалла от теоретической схемы Странского.

¹ На русском языке эта теория изложена А. В. Шубниковым [25] и Н. Н. Шефталем [24].

² Аналогичная картина ускоренного зарастания граней при входящих углах приведена Н. П. Старковым [22, рис. 1]. Он дает зарисовку гексагонального сечения трех слившихся ромбододекаэдров граната и справедливо отмечает, что зарастают грани с относительно большой скоростью. Следовало бы добавить, что в данном случае одни из граней того же символа именно потому имеют большую скорость, что прилегают ко входящим углам сростка.

Об ускоренном зарастании сторон при входящих углах свидетельствует, вероятно, и рисунок двумерных кристаллов парафина, воспроизведенный А. В. Шубниковым [26, стр. 414]. Кристаллы со входящими углами являются уже сростками. Стороны при входящих углах короче остальных потому, что ускоренное зарастание входящих углов уже происходило.

2. Зарастание дефектов слоевых линий

Дефекты слоевых линий того или иного блока в виде входящих углов 120° и 60° бывают одиночными, т. е. только в одном слое (рис. 31, д, е), и групповыми, т. е. в ряде смежных слоев (рис. 31, ж, з, и, к). Для групповых дефектов с входящим углом 120° (рис. 31, е, ж, з) особенно отчетливо наблюдается оригинальная закономерность: в ряде смежных зон дефект почти не зарастает или величина его дает небольшие колебания то в сторону зарастания, то даже в сторону незначительного разрастания, а затем после ряда таких зон дефект быстро исчезает.

Разберем закономерности зарастания одиночных и групповых дефектов на зонарном рисунке, являющемся проекцией ступенчато-слоистого агрегата на плоскость пинакоида. Для этого, пользуясь прежним методом, определим относительные скорости их зарастания (табл. 5).

Таблица 5

Номер рисунка	t	v	Примечание
1. Одиночные дефекты			
Для угла 120°			
31, д	$<3-2,5$	$>2-2,3$	
Для угла 60°			
31, е	$<1,5$	$>0,83$	$v >> 0,83?$
2. Групповые дефекты			
Для угла 120°			
31, е	Приближается к ∞	~ 1	Дефект от зоны к зоне слабо уменьшается или даже увеличивается
31, ж	То же	~ 1	Дефект то слабо уменьшается, то увеличивается
31, з	» »	~ 1	Дефект то увеличивается, то остается почти неизменным
Для угла 60°			
31, и (западная группа)	~ 1	~ 1	
31, и (восточная группа)	>3	$<0,67$	
31, к (восточная группа)	$>2,2$	$<0,73$	

Довольно широкие колебания величин l и v для угла 120° и 60° можно отнести за счет невозможности достаточно точных определений. Все же на основании полученных величин можно сделать следующие выводы.

Зарастание одиночных дефектов слоевых линий при входящем угле 120° , как и для систем слоев, происходит ускоренно. О скорости зарастания одиночных дефектов слоевых линий при входящем угле 60° судить трудно из-за довольно большого интервала между слоевой линией с дефектом и смежной с ней периферической. Возможно, зарастание одиночных дефектов слоевых линий при входящем угле 60° происходит тем же темпом, что и для систем слоев, и во всяком случае более ускоренно, чем у групповых дефектов с углом 60° . Зарастание групповых дефектов и в 120° (кроме последнего ускоренного этапа) и в 60° на зонарном рисунке явно замедленное по сравнению с зарастанием входящих углов двух систем слоев. При этом скорость v зарастания групповых дефектов в 60° нередко < 1 , т. е. вообще замедленная, а скорость v продвижения сторон входящего угла 120° групповых дефектов близка к единице, т. е. дефект уменьшается в малой степени или спорадически даже увеличивается.

Чем же объяснить замедленное зарастание групповых дефектов зонарного рисунка по сравнению с зарастанием входящих углов систем слоев или одиночных дефектов в отдельных слоях?

Прежде чем ответить на данный вопрос, необходимо уточнить, что представляют собой групповые дефекты, каким образом возможно их образование и развитие. К сожалению, рассмотрение этого вопроса приходится делать почти только с геометрической стороны.

Групповые дефекты образуют узор из серии дефектов, расположенных на торцах соседних слоев и несколько врезанных в каждый слой. Величина дефекта нередко уменьшается на каждом более периферическом слое и во всяком случае дефект исчезает к периферии. Мало вероятно, что такой узор мог образоваться одновременно на торцах нескольких соседних слоев, так как в этом случае должен был бы получиться сплошной дефект, охватывающий без перерыва ряд слоев и вдоль оси Z и в поперечном направлении (примером этого являются описанные выше впадины). Не может получиться узор из группы дефектов и путем развития дефекта, возникшего на торце одного какого-либо слоя, так как в этом случае изменение дефекта при разрастании слоя происходило бы только в этом слое. Остается одно наиболее вероятное предположение: в некотором пункте (с некоторыми определенными координатами относительно плоскости XUW) в группе соседних слоев по мере достижения каждым из них этого

пункта при разрастании возникал в каждом из этих слоев дефект, который затем, при дальнейшем разрастании слоя, изменялся. Благодаря этому и получается групповой дефект, т. е. узор из серии дефектов, постепенно уменьшающихся или более резко ликвидирующихся к периферии слоистого зонарного агрегата. Возникновение дефекта в каждом вышележащем слое в одном и том же (т. е. с теми же координатами относительно плоскости XUW), а не в разных пунктах, не менее допустимо, чем зарождение вообще каждого нового слоя в некотором одном и том же пункте, в котором до него возникали нижележащие слои, разрастающиеся концентрически (подобный пункт и является концентром).

Вероятно, что дефект, возникший в том или ином слое, по мере разрастания последнего должен изменяться с соблюдением той же закономерности, какая установлена для зарастания угла сросшихся систем слоев, т. е. должен ускоренно уменьшаться. В этом случае закономерность изменения дефекта на зонарном рисунке будет соответствовать закономерности изменения входящего угла двух срастающихся систем слоев (или такого же изменения в отдельном слое) при условии, что в каждом из группы слоев величина дефекта и в момент возникновения будет одна и та же. Несоответствие (довольно резкое) темпов изменения группового дефекта зонарного рисунка и входящего угла двух систем слоев приводит к единственному заключению: в каждом из группы дефектных слоев возникает дефект разной величины. При этом, если дефект от зоны к зоне уменьшается более замедленным темпом, чем зарастание входящего угла систем слоев, то в каждом вышележащем слое дефект должен возникать уменьшенным по сравнению с размером дефекта в нижележащем слое.

Разберем варианты зависимости изменения дефекта от слоя к слою от изменения дефекта на зонарном рисунке (табл. 6).

Будем считать, что при всех вариантах изменению дефекта в любом отдельном слое при его разрастании присущ только один и тот же темп некоторого определенного ускоренного зарастания, такой же, как и темп зарастания (выясненный ранее) входящих углов систем слоев.

Посмотрим, как должен изменяться возникающий дефект в каждом вышележащем слое в зависимости от характера изменения дефекта на зонарном рисунке.

Вариант I. На рис. 33а показана (в разрезе вдоль оси Z) группа из 7 слоев, разделенных вертикальными линиями на интервалы разрастания. Жирными горизонтальными черточками обозначена величина дефекта в конце каждого интервала. Весь ряд черточек одного и того же слоя должен изображать указанную выше закономерность ускоренного зарастания дефекта в разра-

Таблица 6

Вариант	Исходные данные		
	характер изменения дефекта при разрастании каждого слоя от интервала к интервалу	абсолютная величина разности прогрессии для зонарного рисунка a, d	характер изменения дефекта на зонарном рисунке в направлении к его периферии
I	Дефект застает в порядке убывающей арифметической прогрессии, абсолютная величина разности которой равна d_1	$d < d_1$	Дефект увеличивается
II	То же	$d = 0$	Величина дефекта не изменяется
III	»	$d < d_1$	Дефект уменьшается медленнее, чем в слое
IV	»	$d = d_1$	Дефект уменьшается с той же скоростью, что и в каждом слое
V	»	$d > d_1$	Дефект застает быстрее, чем в слое
VI	»	$d \gg d_1$	То же
VII	»	$d \ggg d_1$	»

	Результат		Частота явления на зонарном рисунке	Номер рисунка
	характер изменения дефекта от слоя к слою вверх	абсолютная величина разности прогрессии от слоя к слою d_2		
	Дефект уменьшается	$d_2 > d_1$	Сporадические колебания	33, а 31, ж, з и некоторые зоны е
	То же	$d_2 = d_1$	Встречается часто	33, б, 31, е, ж и отчасти з
	»	$d_2 < d_1$	Встречается часто	33, в, 31, з (западная и восточная группы)
	Дефект не изменяется	$d_2 = 0$	Никогда не встречается	33, г
	Дефект увеличивается	$d_2 < d_1$		33, д
	То же	$d_2 = d_1$	Никогда не встречается	—
	»	$d_2 > d_1$		—

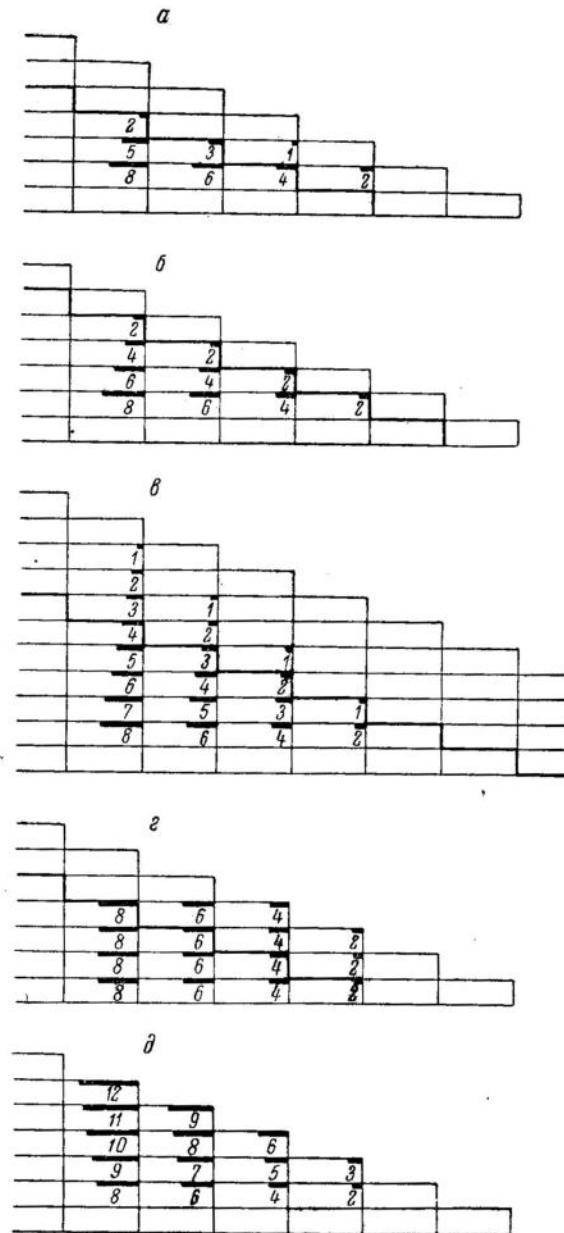


Рис. 33. Варианты зависимости между изменением дефекта от слоя к слою и изменением дефекта на зонарном рисунке (разрез)

стающимся слое¹. Разность величин соседних черточек в слое взята произвольной, но постоянной для всех интервалов каждого слоя и всех слоев. Цифра под каждой черточкой, как и длина черточки, означает величину дефекта в произвольных единицах. На схеме показан случай, когда в трех средних слоях дефект на зонарном рисунке (на ступенчатой поверхности, ограниченной на схеме утолщенной ломаной линией) увеличивается. Из схемы и табл. 6 ясно, что для этого необходимо, чтобы дефект в каждом вышележащем слое возникал уменьшенным, и чтобы при этом темп уменьшения возникающих дефектов от слоя к слою был большим, чем принятый нами темп уменьшения дефекта в каждом слое от интервала к интервалу. Подобные случаи увеличения дефекта на зонарном рисунке наблюдаются лишь спорадически, в пределах немногих зон того или иного группового дефекта.

Вариант II. Когда на зонарном рисунке нескольких слоев дефект остается неизменным (рис. 33, б) необходимо, чтобы дефект возникал от слоя к слою уменьшенным, но темп уменьшения возникающих дефектов от слоя к слою соответствовал бы темпу уменьшения дефекта в каждом слое. Такие случаи на зонарном рисунке наблюдаются часто.

Вариант III. Величина дефекта на зонарном рисунке не остается неизменной (рис. 33, в), а уменьшается, но более медленно, чем застает дефект в слое. Возникающие дефекты также должны уменьшаться от нижележащего слоя к вышележащему, но более медленно, чем в первом и во втором вариантах и чем темп уменьшения дефекта в слое. Случаи третьего варианта наблюдаются на зонарном рисунке, пожалуй, не менее часто, чем второго.

Вариант IV. При том же темпе застания группового дефекта на зонарном рисунке, что и темп застания дефекта в слое (рис. 33, г), дефект в ряде слоев должен возникать неизменной величины. Но такого соответствия для группового дефекта не наблюдается, поэтому данный вариант отпадает. Видимое же «ускоренное» исчезновение на зонарном рисунке крайнего (наиболее периферического) дефекта 120° (рис. 31, е, ж, з), повидимому, объясняется тем, что слой с крайним дефектом подстилается слоем, в котором дефект вообще не возник (рис. 33, а, б, в).

¹ Чтобы закономерность застания дефекта выражалась не сложнее, чем арифметической прогрессией, величину дефекта берем линейную (например, длину стороны входящего угла, высоту треугольника, построенного на сторонах угла, основание этого треугольника и т. п.), но не площадную. Тогда разность прогрессии d представляет собой уменьшение величины дефекта в слое от каждого его интервала к соседнему. Все интервалы считаются равными.

Процесс возникновения дефекта в каждом новом слое следует понимать, как прерывистый, а процесс изменения дефекта в отдельном слое — непрерывный. На рис. 33 в непрерывном процессе изменения дефекта в слое выделены в отдельные моменты, относящиеся к концу каждого интервала.

Вариант V. Более быстрого темпа зарастания группового дефекта, чем дефекта в слое на зонарном рисунке, никогда не наблюдалось (рис. 33, д). Следовательно, дефект, возникающий в слое, не может возникать увеличенным в вышележащих слоях, и варианты V, VI и VII (см. табл. 6) вообще приходится отбросить.

Итак, фактически наблюдаются групповые дефекты с узорами по второму и третьему варианту, т. е. дефекты, почти не изменяющиеся в группе смежных зон или с замедленным темпом зарастания по сравнению с темпом уменьшения дефекта в разрастающемся слое (см. табл. 6). Групповые дефекты с узорами I варианта, т. е. увеличивающиеся, наблюдаются лишь спорадически на некоторых зонах группы. Остальные четыре варианта отпадают вовсе. Предположение о том, что возникающий дефект может от слоя к слою сначала увеличиваться, а затем уменьшаться, было бы несостоительно, так как в таком случае на участках, где процесс развития ступенчато-слоистого агрегата остановился бы на стадии зарождения слоя с увеличивающимся дефектом, наблюдался бы узор вариантов V, VI или VII, т. е. зарастание дефекта более ускоренным темпом, чем в слое¹. Можно сделать следующие основные выводы:

1. Замедленное зарастание групповых дефектов зонарного рисунка вообще и в частности по сравнению с темпом зарастания входящих углов отдельных слоев и срастающихся систем слоев следует объяснить тем, что дефект, возникающий в некотором слое, повторяется в том же пункте в ряде вышележащих слоев, затухая от слоя к слою.

2. Темп затухания дефекта от слоя к слою часто соответствует или близок темпу зарастания дефекта в слое от интервала к интервалу.

3. Как и в отдельном слое, дефект от слоя к слою только уменьшается, но не остается неизменным и тем более не увеличивается.

4. Как и в каждом слое, изменение дефекта от слоя к слою не колебательный процесс, а направленное изменение (по величине). При этом направленное изменение дефекта в сторону его уменьшения спорадически осложняется временными колебаниями (в сторону временного увеличения дефекта по I варианту).

Таким образом, закономерность изменения дефекта от слоя к слою, если не тождественна, то во всяком случае близка к закономерности изменения дефекта в каждом слое. Это звучит достаточно парадоксально, если учесть, что механизм нарастания

¹ Можно разобрать не 7, а 49 вариантов, если поставить для изменения дефекта в слое еще 6 условий, аналогичных условиям, взятым для характера изменения дефекта на зонарном рисунке. Но такие дополнительные условия изменения дефекта в слое вряд ли имеют место в действительности.

слоев как будто имеет мало общего с механизмом разрастания каждого отдельного слоя. Концентричное нарастание слоев роста, т. е. возникновение серии слоев в точках, лежащих на одной линии, параллельной оси Z, легко объяснить одними лишь условиями геометрического отбора. Но пока не выяснено, почему изменение возникающего дефекта от слоя к слою подчиняется закономерности, аналогичной закономерности изменения дефекта в слое.

VIII. О ПОВТОРЯЕМОСТИ И ВЗАИМОСВЯЗИ ЯВЛЕНИЙ В СОСЕДНИХ СЛОЯХ

Проекция системы слоев, являющейся ступенчато-слоистым агрегатом, на плоскость пинакоида представляет собой зонарный рисунок, сходный с зонарной структурой роста кристалла в разрезе параллельно пинакоиду. Можно ли по такому зонарному рисунку ступенчато-слоистого агрегата судить об истории его развития так, как если бы это была структура зон роста кристалла? Другими словами, в каких случаях и в какой мере контуры периферических, т. е. нижележащих, слоев агрегата и их детали на прошедших этапах своего роста последовательно совпадали (в проекции на плоскость пинакоида) с современными контурами всех более центральных, т. е. вышележащих слоев вплоть до зародышей? Для ответа на этот вопрос необходимо подытожить ранее изложенные наблюдения.

Зонарные контуры отдельной системы слоев, как свидетельствуют наблюдения, концентричны, однако не в идеальном виде, а приближенно. Чаще соседние контуры разъединены, но местами те или иные линии, принадлежащие разным контурам, притыкаются одна к другой (грани полного торможения). Ширина площадок между соседними линиями не одинакова, хотя предел колебаний и не очень велик. Следовательно, совпадение¹ контуров слоев в процессе их развития было лишь приближенным.

Заметим, что и зоны роста бывают концентричны лишь с той или иной степенью приближения, что, несомненно, зависит от разной скорости роста граней кристалла. И при зонарном узоре слоистого агрегата недостаточную концентричность контуров можно объяснить колебаниями в скорости роста как каждого слоя в целом, так и отдельных торцевых граней одного и того же слоя.

В таком случае зонарный рисунок свидетельствует о ниже-следующем: 1) разные слои агрегата разрастаются с разными скоростями при колебании этих скоростей по отношению к некоторой средней величине; 2) разные секторы зонарного гексаго-

¹ Здесь и ниже под совпадением понимается совпадение не в пространстве, а в проекции на плоскость пинакоида. Совпадение — совмещение контура вышележащего слоя или его детали с бывшим контуром нижележащего слоя или его детали.

на, т. е. разные совокупности всех торцовых гранок одного символа (например, символа $\{10\bar{1}\}$, или символа $\{0\bar{1}1\}$ и т. п.), имеют разную среднюю скорость продвижения, очевидно колеблющуюся по отношению к некоторой средней величине¹; 3) в пределах одного сектора либо скорость продвижения отдельных боковых гранок колеблется относительно некоторой средней величины, либо более закономерно чередуются периоды увеличения скорости с периодами уменьшения скорости нескольких соседних гранок, что также сводится к колебанию относительно некоторой средней величины.

Таким образом, и отдельные слои агрегата, и секторы и, наконец, отдельные гранки не имеют направленного изменения скорости продвижения, т. е. скорость не имеет закономерного увеличения или уменьшения, а лишь дает относительно незначительные колебания в ту или другую сторону. Следовательно, вышележащие слои повторяют контуры нижележащих слоев, повторяют их историю развития с той степенью приближения, которая соответствует амплитуде колебания скоростей развития слоев.

Объясняемую недостаточную концентричность слоистого агрегата колебаниями скорости роста отдельных слоев и их частей, мы тем самым принимаем, что зародышевые точки всех слоев агрегата совпадают. При зонах роста, естественно, имеется единый исходный центр кристаллизации. Однако можно предположить, что для слоистого агрегата причиной недостаточной концентричности является не только разная скорость развития зон при совпадении их центров, но и несовпадение зародышевых центров разных слоев при равной скорости их развития. Отрицать возможность разной скорости роста слоев как главной причины недостаточной их концентричности нет оснований. Проявляет ли себя наряду с этой главной причиной также и смещение зародышевых центров, определено утверждать нельзя за отсутствием соответствующих наблюдений. Возможность же подобного смещения не исключена. Существует, по крайней мере, принципиальное различие между зонарной структурой роста кристалла и зонарным рисунком слоистого агрегата: в первом случае имеется лишь единственный центр кристаллизации, а во втором — возможны хотя и сближенные, но не совпадающие центры кристаллизации каждого слоя.

Но даже если смещение центра кристаллизации имеет место, амплитуда смещения, повидимому, незначительна, с отклонениями в разных направлениях, т. е. если центры зарождения слоев агрегата и не лежат на прямой линии, параллельной оси Z , то все

¹ Как указано выше, средняя скорость продвижения сектора не зависит от направления вытянутости блока.

же описывают в пространстве неправильную траекторию только с небольшими отклонениями от этой линии. Если бы смещение было не колебательным, а направленным в одну сторону (имело бы направленный вектор в плоскости пинакоида), то ширина одних секторов агрегата и зон между ними была бы систематически большей, чем ширина других. Такой систематичности обычно не наблюдается. Следовательно, не только при колебании скоростей развития слоев и их секторов, но и при колебании положения зародыша каждого слоя вышележащие слои должны приближенно повторять историю нижележащих.

Однако в развитии слоев наблюдаются явления и другого порядка, которые создают особые закономерности развития зонарного рисунка агрегата, отражающие именно механизмы развития деталей в слоях и отличающиеся от закономерностей развития каждого слоя в отдельности, т. е. закономерностей зонарного роста кристалла. Это подтвердилось и изучением групповых дефектов в слоях, где закономерность развития дефектов зонарного рисунка не идентична закономерности развития дефекта в отдельном слое. Причина неидентичности кроется в том, что дефект возникает в ряде слоев, не просто повторяясь в неизменном виде, а изменяясь по величине с определенной закономерностью, присущей ему в направлении от слоя к слою, т. е. вдоль оси Z .

Изложенные выше построения и выводы указывают, что закономерность развития группового дефекта на зонарном рисунке нельзя отождествлять с зонарной структурой развития дефекта в каждом отдельном слое, так как имеется специфическая закономерность не колебательного, а направленного изменения величины дефекта от слоя к слою. Поэтому восстановить историю развития дефекта в каждом слое можно лишь путем более сложных построений, хотя и на основе зонарного рисунка агрегата.

Несоответствие изменения дефекта на зонарном рисунке изменению дефекта в отдельном слое бывает обусловлено не только направленным изменением величины дефекта от слоя к слою, но и направленным изменением положения дефекта от слоя к слою. Так, на зонарном рисунке групповой дефект (восточный на рис. 31, *и*) не только застает замедленно, но ось застания (шов срастания сторон входящего угла) отклоняется от положения биссектрисы входящего угла (в данном случае отклонение к северо-западу). Подобное отклонение оси застания, как указано выше, может быть обусловлено в одном слое разной скоростью роста сторон входящего угла (см. рис. 30). Не в слоистом агрегате эти скорости роста могут быть равны, а ось застания все же будет отклонена от положения биссектрисы угла. Это возможно в том случае, если взаимосвязанные дефекты, возникающие в соседних слоях, не будут совпадать не только по ве-

личине, но и по своему положению, т. е. место возникновения дефекта по мере его появления в каждом вышележащем слое будет закономерно смещаться в определенном направлении (на рис. 31, *и* смещение должно происходить в положительном направлении к оси *Y*, т. е. в направлении на восток). Нет оснований к тому, чтобы скорости роста сторон зарастающего входящего угла были разные, да еще в сочетании с тем, что скорости роста прилегающих к входящему углу отрезков зонарной линии остаются равными. Поэтому более вероятно второе предположение о том, что в подобных случаях от слоя к слою происходит смещение очага возникновения дефекта. Это предположение, между прочим, наводит на мысль о том, что и центр зарождения каждого нового слоя может претерпевать смещение¹.

Подводя итоги разобранным явлениям, приходим к выводу, что ни вышележащие слои не повторяют в точности историю развития нижележащих слоев, ни детали каждого вышележащего слоя не являются точной копией деталей нижележащих слоев в соответствующие периоды развития последних. Но, несмотря на то, что точное повторение не имеет места ни по положению в пространстве, ни по величине, всем слоям одного агрегата свойственна относительно простая закономерная взаимосвязь. Более сложная связь свойственна группам деталей слоев, а более простая взаимосвязь обусловлена тем, что при зарождении и развитии слоев имеют место только отклонения незначительные и не направленные ни по величине, ни по положению, что приводит к приближенной повторяемости явлений (зависящих от скорости роста слоев и их боковых граней в отдельности и положения центра кристаллизации слоев). Для общих представлений и выводов нередко можно пренебречь подобными отклонениями и считать указанные явления приближенно повторяющимися. Тогда для круга явлений, регулируемых подобными закономерностями, вполне возможно с допустимой погрешностью рассматривать изменения в зонарном рисунке ступенчато-слоистого агрегата, как изменения любого его слоя, т. е. оперировать с подобным зонарным рисунком, как с сечением зон роста кристалла. Но есть также явления, подчиненные закономерностям иного типа, выражающимся в изменениях вдоль оси *Z* (изменение величины дефектов от слоя к слою) или в заметных направленных изменениях в поперечном направлении (изменение положения очагов возникновения дефектов). Явления последнего типа искажают зонарный

¹ Еще одним доводом в пользу возможности смещения от оси *Z* центра кристаллизации в каждом новом слое может служить то, что ширина секторов зонарного рисунка, обращенных в сторону вытянутости блока, бывает нередко меньшей, чем секторов поперечных. Если бы это было обусловлено скоростью роста, то скорость роста первых секторов была бы меньше скорости роста вторых секторов, что неправдоподобно.

рисунок (проекцию) ступенчато-слоистого агрегата по сравнению с зонарной структурой роста кристалла. Для выяснения истории развития подобных явлений, чтобы не впасть в ошибку, недопустимо оперировать с зонарным рисунком агрегата, как со структурой зонарного роста кристалла, а необходимы несколько более сложные приемы.

IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лучше всего удалось изучить рельеф, обнаруживаемый на гранях пинакоида некоторых кристаллов берилла. На этих гранях в некоторых случаях основными элементами рельефа являются выступы и впадины разных размеров, причем изучение деталей структуры показывает, что впадины образовались не благодаря растворению кристалла, а в процессе его роста.

В других случаях на грани почти нет впадин, но все же она ступенчатая. Выступы на гранях пинакоида ограничены площадками простого или ступенчатого пинакоида с {0001} и боковой поверхностью, составленной гексагональными призмами первого рода *a* {1010} и второго рода *b* {1120} и дигексагональными призмами {hkīO}, местами притупленными микроскопически мелкими гранками гексагональных дипирамид первого рода *p* {1011}, иногда второго рода *s* {1121} и еще реже дигексагональными дипирамидами {hkīl}. Этим огранка мелкорельефных деталей отличается от огранки кристаллов берилла данного типа в целом, габитус которых характеризуется наличием только граней *c* и *a* при почти полном отсутствии подчиненных граней. Для боковой поверхности выступов характерно также наличие местами своеобразных клиньев, образованных комбинацией граней призматических и косой (чаще одной) с заострением клина в сторону впадины. Подавляющее большинство косых граней относится к огранке клиньев. Для многих мелких выступов характерна форма, приближающаяся к скелетной.

Наиболее интересны тонкорельефные ступенчатые зонарные (концентрические) узоры на гранях пинакоида, несомненно отражающие ступенчато-слоистый рост кристалла. Под микроскопом в отраженном свете узор хорошо различим на светлом фоне пинакоида в виде черных слоевых линий, образующих концентрические многоугольники гексагонального облика, т. е. со сторонами, сходящимися под углом 120°. Световыми эффектами выяснено, что эти линии являются уступами на ступенчатой поверхности пинакоида и, следовательно, представляют собой боковую поверхность (торец) слоев роста на грани *c*. На федоровском столике определяется, что уступы представляют собой тонкие вытянутые плоские грани призмы *a*, иногда в комбинации с короткими сторонами *b* или {hkīO}. Значительно реже наблюдаются уступы из гранок

дипирамид — в основном *p* и реже *s*. Гранки дипирамид в виде плоских площадок хорошо различимы даже при ширине 0,001—0,002 мм. Их символы устанавливаются измерением угла с плоскостью *c*. Гранки призм определяются не всегда с такой же достоверностью. Зонарные узоры из призматических гранок почти полностью относятся к внутренним частям крупных площадок пинакоида, а косые ступеньки характерны для периферических зон узора, вблизи впадин или для всех зон на мелких выступах.

Определение символов микроскопически мелких гранок берилла, являющихся торцами слоев роста, имеет значение для сообщений о механизме роста кристаллов. Таких материалов по кристаллам других минералов пока еще мало. Что представляют собой по своим символам торцевые поверхности слоев роста кристаллов, не удалось выяснить ни Л. Графу относительно поверхности всех выплавленных им металлов [30], ни Д. Гейсту и его предшественникам в отношении кристаллов металлов, полученных возгонкой [29], ни С. В. Банну и Г. Эмметту из многолетних наблюдений роста кристаллов из растворов многих веществ [21]. Повидимому, этим исследователям не были известны более ранние материалы, опубликованные преимущественно на русском языке.

В связи с этим Д. Гейст вовсе не касается вопросов механизма роста, Л. Граф строит предположения без учета имеющегося фактического материала, а С. В. Банн и Г. Эмметт исходят из неправильных предположений, что торцы слоев обязательно имеют сложные индексы и что только поэтому возможен рост кристаллов. Между тем более ранними работами Г. Кальба [32], О. М. Анишеса [2], Д. П. Григорьева и И. И. Шафрановского [5] устанавливаются не только сложные, но в ряде случаев и простые индексы тонких гранок на ступенчатой поверхности минералов. Наше исследование также позволило установить, что торцы слоев берилла имеют простые индексы и что не следует принимать предпосылки роста кристалла, выдвинутой С. В. Банном и Г. Эмметтом.

Кстати, Л. И. Гриффин интерферометрическим методом обнаружил на некоторых кристаллах берилла широкое развитие слоистой структуры (ступенчатой.—Г. В.) с толщиной слоев (высотой уступов.—Г. В.) от нескольких сотен до трех или четырех молекулярных расстояний [31, стр. 192]. Однако осталось неизвестным, какие индексы имеют торцы слоев. Тем не менее Л. И. Гриффин считает, что указанным методом можно определять индексы торцов более толстых слоев (т. е. толщиной в десяти доли μ и что некоторые данные для определения им уже получены. На основании этого он для берилла принимает предположение С. В. Банна и Г. Эмметта о сложных индексах торцов слоев. Таким образом, Л. И. Гриффин не имеет определенных данных об индексах торцевых гранок слоев. Нет у него исчерпывающих

данных и по другим деталям поверхностных структур берилла. Так, например, указание о тенденции контуров слоев к совпадению с симметрией правильно, но замечание о том, что эта тенденция особенно проявляется для очень тонких слоев, вызывает недоумение (по нашим данным, эта тенденция свойственна и толстым слоям). Впрочем, сам Л. И. Гриффин признает, что его наблюдения над бериллом пока не являются обширными.

По зонарным узорам на кристаллах берилла устанавливается расположение центров кристаллизации той или иной системы слоев на грани *c*. Таких зародышевых центров на грани нередко довольно много. Системы слоев, развивающиеся от разных центров, при достаточном разрастании закономерно срастаются с образованием на периферии единого зонарного узора. В ряде случаев развитие подобного блока из сросшихся систем слоев полностью тормозится особыми боковыми призматическими поверхностями — швами нарастания. После некоторого перерыва из зародышей, возникающих у подобного шва, снова начинают развиваться системы слоев и из их совокупности — новые блоки. Таким путем намечается развитие кристалла из последовательно образующихся блоков. Разница между блоками и системами слоев заключается в том, что системы слоев срастаются, а блоки нарастают друг на друга. Иногда одна часть блока на некотором интервале нарастает на смежную, а затем обе части растут как единый агрегат.

Все эти наблюдения указывают на то, 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 целое¹.

В таком комплексном развитии кристалла обнаруживается своеобразная последовательность нарастания. Установлено, что в некоторых случаях (при строении из блоков) имеют место перерывы в отложении кристаллического вещества. В комплексном развитии кристалла грани полного торможения (например, швы нарастания) играют двойную роль противоположного значения: они прекращают развитие одних кристаллических совокупностей и способствуют зарождению других.

Идея о том, что кристалл состоит из субиндивидов нескольких порядков, была разработана еще М. Ерофеевым — автором учения о скучивании кристаллов [11]. Он считал, что наблюдаемые на реальных кристаллах неравенство величин одноименных гранных углов, полиэдрия (т. е. вицинальность) и разнообразие граней являются следствием того, что «...кристалл есть сросток, куча неделимых...»², сросшихся в непараллельном, но закономерном по-

¹ Молекулы не непосредственно слагаются в микроскопически видимые слои, но это вытекает не из наблюдений над бериллом.

² Вместо выражения «неделимое» сейчас употребляют термин индивид.

ложении. Это учение получило дальнейшее развитие у А. Н. Карножицкого [15].

Заметим, что Е. С. Федоров не разделял полностью обобщений учения о скучивании. Он, разумеется, знал, что «...из простых индивидов могут возникать сложные образования, которые можно принимать за индивиды высшего порядка» [27]. В таких образованиях, по Е. С. Федорову, наблюдаются явления несовершенства кристалла (прежде всего, его граней): 1) явления без нарушения кристаллической однородности, т. е. без нарушения параллельного расположения индивидов,—вицинальные плоскости вплоть до искривленности или выпуклости граней (например, алмаза), комбинационная штриховка граней, ступенчатость граней и кристаллов (например, галита), скелетные формы кристаллов; 2) явления с нарушением кристаллической однородности. О последних Е. С. Федоров указал, что далеко не всякое скучивание подчиняется определенным законам: «В большинстве случаев скучивание есть для нас только выражение неправильного срастания элементарных индивидов под очень маленькими углами» [27].

Действительно, для представлений, возникающих при изучении берилла, имеет значение не все учение о скучивании в целом, а лишь выводы М. Ерофеева о том, что «друзообразность» граней кристалла является следствием срастания его из субиндивидов (в параллельном положении.—Г. В.), а также соображения А. Н. Карножицкого о послойном росте кристаллов. Причем «друзообразность» и послойное строение — не два независимых способа построения кристалла, так как субиндивиды образуются из слоев.

Форма тех или иных кристаллических комплексов берилла неоднократно изменяется на разных стадиях развития — от близкой к изометричной до вытянутой¹. Так, при развитии кристаллических комплексов последовательными формами могут быть: изометрическая — зародыша, вытянутая — мало развитого слоя, изометрическая — системы слоев, вытянутая — сомкнувшихся систем слоев, изометрическая — сросшихся систем слоев, вытянутая — сросшихся систем, оборванных швом, т. е. блока, и изометрическая — сростка блоков. Это указывает на противоречивые тенденции в развитии кристалла с преобладанием тенденций к изометричности. Как выясняется геометрическим анализом, тенденция к изометричности имела бы даже при равномерном развитии частей кристалла, но она еще более усиливается наличием на поверхности растущего кристалла местоположений, особенно благоприятных для роста.

¹ В данном случае речь идет о довольно плоских формах, но можно говорить, вероятно, и о формах в трех измерениях.

Относительно таких положений на кристалле, благоприятных для возникновения новых зародышей, получены следующие данные. На изолированной мелкой площадке пинакоида возникают немногие (3—4) зародыша у ребер вблизи вершин. Сильно расчлененные впадинами грани образованы из многих центров кристаллизации, что свидетельствует о неравномерном распределении питающих кристалл компонентов в минералообразующем растворе. Швы нарастания, образующие с основной площадкой двугранный угол, несравненно более благоприятны для возникновения зародышей, чем края площадки. Однако зародыша возникают лишь в некоторых точках вдоль шва нарастания, очевидно, потому, что в этих точках имеет место еще и второй благоприятный фактор — большая пересыщенность раствора. Для роста же слоев наиболее благоприятны входящие углы, образующиеся при смыкании систем слоев. Поскольку такие углы трехгранны, они быстро зарастают. По той же причине быстро ликвидируются аналогичные дефекты ограничения отдельных слоев.

Все это подтверждает ранее высказанное О. М. Аншелесом предположение, что теория Косселя-Странского о предпочтительной роли входящих двугранных и особенно трехгранных углов в процессе роста кристалла имеет значение не только для теоретических случаев роста кристалла элементарно тонкими (ионными, молекулярными) слоями и в идеальных условиях, но и для роста кристалла за счет агрегатов молекул толстыми слоями и в реальных условиях среды [1].

При изучении берилла, однако, обнаружилось, что входящие двугранные углы при росте реального кристалла бывают двоякого рода. Одни углы (например, при швах нарастания) не только не способствуют продолжению роста, но прекращают рост блоков из системы слоев. Лишь некоторые точки на ребре такого угла благоприятны для зарождения новых слоев и блоков. Однако рост слоев связан не с наличием подобного угла, а с появлением одновременно с зарождением новых слоев входящих двугранных углов другого рода — между торцами новых слоев и площадками, на которых слои зарождаются. Эти углы благоприятны для продолжения роста слоев, но не способствуют образованию зародышей новых слоев. Ликвидация таких углов (например, на краю грани, у ее ребра) обычно имеет следствием прекращение роста слоя. Первые входящие двугранные углы можно назвать неподвижными, вторые — перемещающимися.

Различаются между собой и трехгранные входящие углы. Одни из них образуются плоскостями при двух перемещающихся двугранных углах и основной площадкой (т. е. при встрече двух слоев роста), и с ними связан эффект ускорения роста слоев. Другие трехгранные углы образуются плоскостями основной площадки,

одного неподвижного и одного перемещающегося двугранного угла (например, между плоскостью шва нарастания и торцом слоя, развивающегося от этого шва). Эти трехгранные углы не вызывают эффекта ускорения роста слоев.

Все сказанное о различиях между входящими углами значительно отличает механизм реального роста кристалла от теоретической схемы Косселя-Странского.

Изучением берилла впервые выяснены такие закономерности развития слоев кристаллического вещества, как срастание слоев и зарастание их дефектов.

Литературные данные о наблюдавшемся утолщении растущих слоев кристалла за счет их слияния удалось пополнить изучением таких структурных деталей на поверхности берилла, которые позволяют установить, что при слиянии слоев по всему периметру или по части его происходит точное совмещение торцевых площадок обоих слоев в единую, более широкую плоскую площадку, что возможно при одинаковых символах сливающихся торцов. Следовательно, нет принципиальной разницы между торцом тонкого слоя и макроскопически видимой гранью кристалла, так как путем утолщения слоев развивается грань. Еще более важный вывод из механизма утолщения слоев заключается в том, что смежные грани кристалла, например, для берилла *s* и *a*, могут разрастаться при условии, что торцом слоя на грани *s* является гранка *a* и наоборот. Следовательно, если торцами слоев на этих гранях является гранка с промежуточным символом, например *p*, то обе основные грани *s* и *a* будут зарастать и появится новая разрастающаяся грань *p*. При других условиях роста грань *s* (или *a*) может, повидимому, разрастаться как грань полного торможения (подобно шву нарастания, обрывающему рост системы слоев).

Эти выводы расходятся с недавно опубликованными соображениями С. В. Банна и Г. Эмметта, объясняющими рост кристалла тем, что торцами слоев на его поверхности являются гранки со сложными индексами [21].

Индекс торца, вероятно, в процессе роста слоя может изменяться, преимущественно, к концу кристаллизации, когда более резко изменяются условия среды. С изменением индекса торца слоя должно быть связано появление новой грани на кристалле. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что к концу кристаллизации индексы торцов слоев (как и индексы новых граней) усложняются.

Многие детали механизма роста кристаллов не обходятся без появления и развития плоскостей полного торможения. Такими плоскостями являются террасы слоев, ограничения клиньев роста и швы между блоками. Грани нередко развиваются из таких плоскостей. Символ торца растущего слоя не может измениться без явления полного торможения.

При изучении структур роста берилла был затронут вопрос о повторяемости и взаимосвязи явлений в слоях. Было выяснено, что при возникновении слоев, связывающихся в систему, не исключена возможность отклонения колебательного характера (т. е. не направленного) точки заоруждения каждого нового слоя системы. Очаг возникновения дефекта на группе слоев в виде входящего угла на их торцовой поверхности может от слоя к слою перемещаться в каком-либо определенном направлении, а величина возникающего дефекта закономерно изменяется (уменьшается) в каждом вышележащем слое.

Установлено, что изученные поверхностные структуры берилла являются структурами роста. Известно, что чем более пересыщен минералообразующий раствор, тем слои роста толще. К концу кристаллизации, по мере истощения раствора, а часто при увеличении содержания в нем примесей, слои становятся более тонкими и перестают быть видимыми [21]. Сохранение ступенчатой структуры на гранях некоторых кристаллов, вероятно, зависит от каких-либо необычных условий окончания роста кристаллов (например, от внезапного прекращения циркуляции раствора до его истощения). Хотя все наблюдавшиеся поверхностные структуры в этом смысле являются «замороженными», все же среди них, по-видимому, следует различать преимущественно свойственные росту кристалла структуры от структур, появляющихся только ближе к концу кристаллизации минерала.

В процессе роста кристаллу свойственны грани с относительно небольшим числом изометрических полостей (от конденсации газовых пузырьков), более толстые слои роста и более простые индексы торцов слоев, притом с соответствием индекса торца индексу смежной грани. Ближе к концу кристаллизации индексы могут, усложняясь, изменяться и появляться новые грани, будет происходить расчленение граней впадинами неправильной формы и разных размеров на выступы с особыми формами выклинивания (клины, полуострова) и скелетные. Повидимому, на кристаллах природных минералов можно чаще встретить вторые структуры, т. е. появляющиеся ближе к концу кристаллизации минерала, а на искусственных кристаллах в процессе роста наблюдать первые структуры.

В заключение отметим, что в литературе нет сколько-нибудь обоснованных данных по одному из наиболее важных вопросов механизма роста кристалла — по вопросу о том, как растет торец слоя: элементарными слоями, т. е. слоями в один ион или молекулу, или более сложно. К сожалению, по этому вопросу изучение берилла также не дало никаких материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аишелес О. М. Некоторые наблюдения над ростом и растворением микроскопических кристаллов гипосульфита. Ученые записки ЛГУ, 1939, № 21.
2. Аишелес О. М. О происхождении штриховки на гранях кристаллов. Ученые записки ЛГУ, 1943, № 88.
3. Вернадский В. И. О комбинационной штриховке кристаллических граней. Известия Академии наук, серия 6, т. 1, 1907.
4. Григорьев Д. П. Замечания об исследованиях В. Г. Ньюхауза и Р. Э. Стойбера по определению направления течения минералообразующих растворов. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1947, ч. 76, вып. 4.
5. Григорьев Д. П. и Шафрановский И. И. Кристаллографическое исследование искусственного корунда. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1941, ч. 70, вып. 1.
6. Доливо-Добровольский В. В., Болдырев А. К., Шафрановский И. И. и др. Определитель кристаллов Т. 1, 2-я половина, ОНТИ, 1939.
7. Еремеев П. В. Сообщение о кристаллах берилла. Записки Минералогического о-ва, 1895, ч. 33, вып. 1.
8. Еремеев П. В. Сообщение о кристаллах золота. Записки Минералогического о-ва, 1895, ч. 33, вып. 2.
9. Еремеев П. В. О двух кристаллах берилла. Записки Минералогического о-ва, 1896, ч. 34.
10. Еремеев П. В. Об особенностях во внутреннем строении берилла. Записки Минералогического о-ва, 1898, ч. 35.
11. Ерофеев М. Кристаллографические и кристаллооптические исследования турмалинов. Записки Минералогического о-ва, 1871, ч. 6.
12. Заварецкий А. Н. Измерение кристаллов при помощи микроскопа с федоровским столиком. Записки Минералогического о-ва, 1929, ч. 58, вып. 2.
13. Икорникова Н. Ю. Кристаллографическое исследование кристаллов берилла. Записки Минералогического о-ва, 1939, ч. 68, вып. 4.
14. Карножицкий А. Н. Об оптической аномалии берилла. Записки Минералогического о-ва, 1891, ч. 27.
15. Карножицкий А. Н. Кристаллооптические исследования турмалина. Записки Минералогического о-ва, 1891, ч. 27.
16. Карножицкий А. Н. Евгение-Максимилиановские минеральные копи и некоторые другие новые мало исследованные месторождения минералов в области Среднего Урала. Записки Минералогического о-ва, 1895, ч. 34, вып. 1.
17. Кокшаров Н. И. Материалы для минералогии России. Берилл. Горный журнал, 1854, ч. 1.
18. Леммлейн Г. Г. Секториальное строение кристалла. Изд. АН СССР, 1948.
19. Михеев В. И. и Шафрановский И. И. О совпадении теоретических и генетических типов кристаллов цинковой обманки. Записки Минералогического о-ва, 1948, ч. 77, вып. 4.
20. Мокиевский В. А. и Семенюк С. Н. Скелетный рост кристаллов в вязкой среде. Записки Минералогического о-ва, 1952, ч. 81, вып. 2.
21. Рост кристаллов. Новые исследования по кристаллографии и кристаллохимии. Сб. I, II, ИЛ, 1950.
22. Старков Н. П. Оптически аномальные гранаты горы Соробы на Южном Урале. Записки Минералогического о-ва, 1950, ч. 79, вып. 4.

23. Толстопятов М. А. К вопросу о кристаллогенезисе (криптопирима). 1916.
24. Шефталь Н. Н. Аксессории роста кристаллов. Труды Института кристаллографии АН СССР, 1947, вып. 3.
25. Шубников А. В. Образование кристаллов. Изд. АН СССР, 1947.
26. Шубников А. В., Флинт Е. Е. и Бокий Г. Б. Основы кристаллографии. Изд. АН СССР, 1940.
27. Федоров Е. С. Курс кристаллографии, 1901.
28. Gadolin A. Verhandl. der Russ. — Kais. Miner. Gesellschaft zu St. Petersburg, 1855—1856.
29. Geist D. Acta cristallographica, 1949, v. 2, p. 1.
30. Graf L. Zeit. f. Elektrochemie u. and. phys. Chemie, 1942, B. 48, № 4.
31. Griffin L. J. Discussions of the Faraday Society, 1949, № 5.
32. Kalb G., Zeit. f. Krist., Miner. u. Petrogr. Abt. A, B. 78.

В. А. МОКИЕВСКИЙ, А. В. СКРОПЫШЕВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ДВОЙНИКОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕНЕЗИСА КАЛЬЦИТА

Механическое двойникование исландского шпата изучено достаточно хорошо [1, 5 и др.]. Механические двойники являются дефектом, который препятствует использованию кристаллов шпата в оптике. В ряде случаев они могут быть устранены искусственно [5]. При расшифровке же некоторых генетических особенностей месторождения наличие механических двойников в кристаллах кальцита может оказать большую услугу.

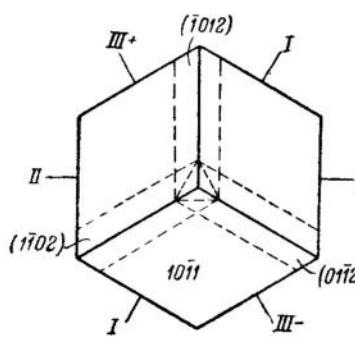


Рис. 1

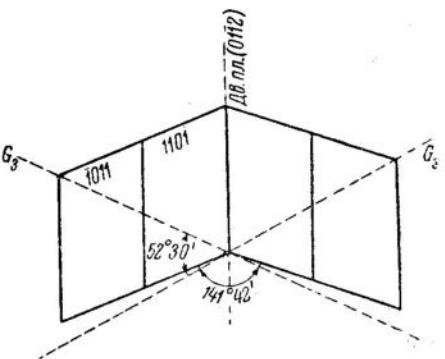


Рис. 2

Напомним, что механические двойники в кристаллах исландского шпата возникают в результате «смещения» плоских сеток структуры в направлении $[0111]$. Двойниковой плоскостью является грань ромбодра $\{1012\}$, а двойниковой осью — нормаль к этой грани. Таким образом, в кристалле кальцита возможны только три системы механических двойников (рис. 1). Оси симметрии третьего порядка у индивидов двойника образуют между собой угол $52^{\circ}30'$ (рис. 2). Формально безразлично, как трактовать механическое двойникование кальцита — как «смещение» плоских сеток вдоль $[0111]$ или как поворот на 180° вокруг двойной оси, или как отражение в двойниковой плоскости. Известно,

что структуру кальцита можно представить, как деформированную по тройной оси структуру поваренной соли. Тогда грани ромбодекаэдра кубического кристалла превратятся в шесть граней призмы {1120} и шесть граней ромбоэдра {1012}. Механическое двойникование кальцита осуществляется аналогично скольжению в NaCl , но только по плоскостям {1012}. В этом гомологичность физических свойств кальцита и поваренной соли [2].

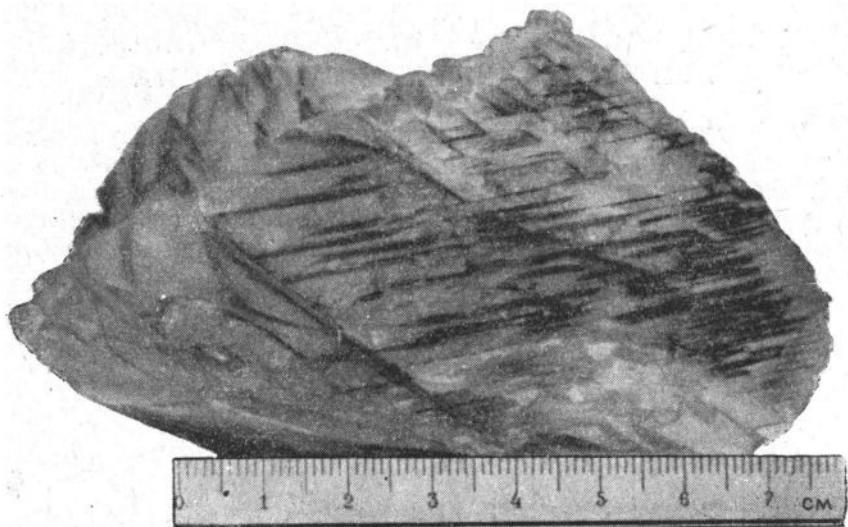


Рис. 3

В природных кристаллах кальцита механические двойники можно наблюдать особенно часто. Они проявляются на поверхности кристалла то в виде одиночных тонких полосок, то в виде редкой или частой штриховки. Если кристалл после двойникования подвергался воздействию иенасыщенного раствора, то растворение происходит наиболее интенсивно по линиям выхода двойников на поверхность. В результате растворения образуются тонкие канавки (рис. 3).

На образце, выколотом по спайности, механические двойники хорошо видны благодаря интерференционной окраске, приуроченной к плоскости двойникования. Двойники по закону {1012} несколько своеобразны и в некоторых случаях могут оставаться незамеченными, так как две плоскости спайности одного сдвоенного индивида параллельны двум плоскостям другого (рис. 4). Например, две плоскости спайности кристалла при надавливании ножом на ребро [0111] не изменяют своего положе-

ния. Поэтому линии выхода механического двойника на поверхность кристалла при двойникование только по одной из плоскостей {1012} можно наблюдать не на всех гранях кристалла. Если, например, кристалл ограничен только плоскостями спайного ромбоэдра, то выходы двойников можно видеть лишь на двух параллельных гранях в результате образования входящих углов. На других гранях следов механического двойника не наблюдается. Явление отсутствия следов механического двойникования на других формах также распространено.

Легко найти, на гранях каких простых форм будут отсутствовать следы механического двойникования. Из стереографической проекции рис. 5 видно, что грани, лежащие в зоне, включающей грани $(01\bar{1}2)$, $(10\bar{1}1)$, $(21\bar{1}0)$, не изменят своего положения при механическом двойникование, так как при повороте вокруг двойниковой оси на 180° все грани этой зоны только меняются местами. На остальных гранях этих форм следы двойникования будут видны. Все сказанное справедливо только в том случае, когда грани кристалла представляют достаточно ровные поверхности. Если же они имеют штриховку, вызванную условиями роста, или другие закономерные дефекты, то на гранях указанной зоны в местах двойника будет наблюдаться изменение закономерностей обозначенных выше дефектов (например, изменение направления штриховки и др.).

По морфологии механических двойников и некоторым другим признакам можно установить относительный возраст двойникования и связать деформации с изменением условий роста и тектоническими движениями.

Нами изучались образцы исландского шпата, имеющие ромбодекаэдрическую форму {4043}. На гранях кристаллов и спайных выколках наблюдались следы одной серии механических двойников {1012}. На поверхности ромбодекаэдрических кристаллов отмечались ребристые наросты, расположенные по линиям — следам механических двойников. Величина этих наростов достигает 35 мм высоты и до 100 мм вдоль следа механического двойника. При гониометрическом изучении одного из образцов установлено, что наросты находятся в двойниковом положении к основному крис-

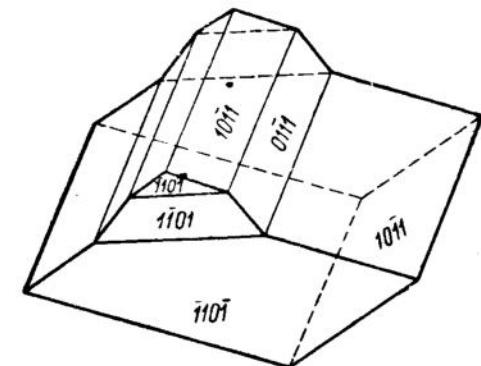


Рис. 4

таллу. Двойниковой плоскостью и плоскостью срастания является грань {1012} — плоскость механического двойникования. Наросты ограничены плоскостями ромбоэдров {4043} и {7074}.

На гранях других кристаллов из этого же месторождения наблюдались такие же нарости, но они проходили в двух направлениях, что соответствует двум сериям механических двойников — по плоскостям (1012) и (0112) (рис. 6).

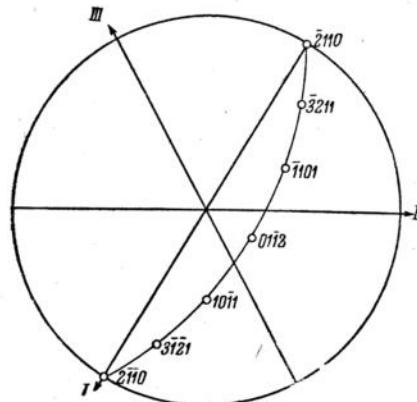


Рис. 5

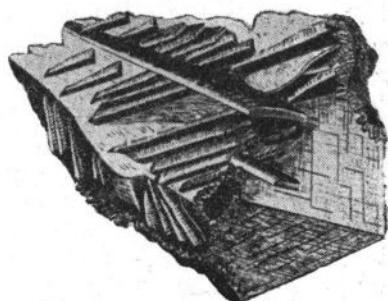


Рис. 6

Таким образом, устанавливается, что при наличии в кристаллах исландского шпата механических двойников в благоприятных условиях растет не вся грань кристалла, а более интенсивный рост идет по линиям выхода механических двойников. Повидимому, при механическом двойникование на месте образования очень тонкого двойникового слоя от поверхности кристалла начинает нарастать второй кристалл. Причем в начальной стадии скорость роста второго индивида значительно больше, чем у основного кристалла, так как двойниковый слой имеет нарушения и образует входящий угол с основным кристаллом [4]. В дальнейшем оба индивида двойника могут расти с одинаковой скоростью.

На некоторых исследованных кристаллах обнаруживается до трех групп различных выступов, представляющих генетически различные образования. Прежде всего различаются выступы, расположенные по линиям выхода одной серии двойников {1012}. Одни из этих выступов, имеющие значительную толщину (до 6 мм), являются более ранними и ограничены теми же плоскостями ромбоэдра, что и основной кристалл, т. е. {4043}. Эти выступы образовались при наиболее ранних деформациях кальцита, происходивших во время или в перерыве роста кристалла.

Другие выступы, расположенные по линиям — следам той же серии механических двойников, имеют незначительную толщину (до 1 мм). Они образовались при более поздних деформациях. Об этом свидетельствуют их размеры и иная форма — {7074}, ограничивающая их поверхность.

Третья располагается на гранях кристалла по линиям — следам другой серии механических двойников — {1102}. Эти нарости отличаются еще большей толщиной (до 8 мм) и прорастают все предыдущие нарости, что свидетельствует об их наиболее позднем образовании.

Таким образом, в период роста кристаллы исландского шпата подвергались по крайней мере трем этапам механических деформаций.

Произведенные исследования позволяют сделать вывод, что описанные выше нарости должны всегда образовываться на поверхностях кристаллов исландского шпата, если механическое двойникование происходит во время или в перерыве роста. Наличие следов механического двойникования при отсутствии нарости свидетельствует о том, что деформация кристаллов происходила по окончании их роста.

Механические двойники в кристаллах исландского шпата свидетельствуют и о происходивших движениях в земной коре вообще и в пределах месторождения в частности. Эти движения могли быть вызваны тектоническими причинами, статической нагрузкой вышележащих пород или даже оползневыми явлениями. Изложенное подтверждается наблюдениями над кристаллами в месторождениях. Так, на некоторых месторождениях кристаллы исландского шпата с механическими двойниками располагаются вблизи трещин, по которым произошло перемещение пород почти в вертикальном направлении. На одном месторождении в шпатоносном горизонте наблюдаются зеркала скольжения, обусловленные незначительными перемещениями шпатоносных пород, которые вызываются статической нагрузкой вышележащих покровов. Кристаллы исландского шпата в этих местах часто подвергнуты механическому двойникование, причем по расположению механических двойников устанавливается направление движения вмещающих пород. Определенное по этим данным направление движения контролируется зеркалами скольжения на породе. Сопоставление двух полученных показателей позволяет безошибочно определить направление движения пород.

ВЫВОДЫ

1. Механическое двойникование в процессе роста устанавливается по наличию ребристых нарости и по зонам роста.
2. Возраст механических двойников определяется по пересечению нарости: более поздние пересекаются более ранними.

3. Наличие механических двойников в кристаллах кальцита свидетельствует о деформациях, вызванных тектоническими и другими причинами, оказывающими давление на кристаллы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гогоберидзе Д. Б. Механическое двойникование. ГОНТИ, 1938.
2. Михеев В. И. Новые идеи в учении о симметрии. Сб. Кристаллография. Труды Федоровской научной сессии 1949 г. Металлургиздат, 1951.
3. Михеев В. И. Гомология кристаллов. Рукопись. Фонды Ленинградского горного института, 1953.
4. Странский И. Н., Каишев Р. К теории роста кристаллов и образования кристаллических зародышей. Успехи физических наук, 1939, вып. 4.
5. Штернберг А. А. Устранение механических двойников в кристаллах оптического кальцита. Ученые записки ЛГУ, серия геолого-почвенных наук, 1945, вып. 13.

О РАЗЛИЧНЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ТИПАХ ПИРИТА

Пирит является наиболее распространенным в земной коре сульфидом. Он встречается как в магматических, так и в осадочных породах, что указывает на способность его кристаллизоваться в широком диапазоне температур и давлений и в различных физико-химических условиях. Обычные формы пирита куб (100), пентагон-додекаэдр (210) и значительно реже — октаэдр (111).

Всякий растущий кристалл, как известно, находится во взаимодействии со средой, в которой происходит его рост, и как-то отражает в своей конституции или морфологии воздействие этой среды.

Учитывая широкую распространенность пирита как в рудах, так и в горных породах, важно выяснить закономерности воздействия внешних условий на форму, структуру и состав пирита, чтобы по ним судить об особенностях обстановки рудоотложения. Хотя исследований в этом направлении производилось очень мало, тем не менее показательны высказывания некоторых авторов. Так С. А. Юшко, изучавшая пирит нескольких месторождений, пришла к выводу, что «...для пирита кристаллографические формы его выделений являются тем критерием, с помощью которого можно, по-видимому, судить об условиях, при которых происходило образование всей минералогической ассоциации, в состав которой входит пирит» [12]. Аналогичное заключение делает и В. А. Копчик, исследовавший пирит Саргадонского месторождения: «...пирит во время своего роста очень чувствителен к изменению термодинамических условий, к степени загрязненности растворов» [5].

Настоящее исследование является попыткой наметить пути исследования причин, определяющих морфологию кристаллов пирита, выяснить закономерности роста различных его граней и закономерности изменения структуры под влиянием различного рода примесей.

1. МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пирит в районе развития древних метаморфических пород встречен в виде скоплений кубических, пентагон-додекаэдрических и октаэдрических кристаллов.

1. Пирит кубического габитуса наблюдается обычно в железистых тонкозернистых алевропесчаниках, алевролитах и сланцах, подвергшихся интенсивной биотитизации и серицитизации. Его кристаллы имеют размеры от десятых долей миллиметра до одного сантиметра. Границы кристаллов обычно лишены комбинационной штриховки и отличаются блестящей поверхностью. Кроме куба, на кристаллах не обнаружено никаких иных простых форм, лишь иногда наблюдаются зачаточные грани октаэдра, слегка притупляющие вершины куба. Наряду с пиритом здесь нередко встречаются и другие сульфиды (халькопирит, борнит, иногда галенит). Установлено, что кубический пирит кристаллизуется в восстановительной среде и, возможно, в условиях некоторого избытка серы. Не вызывает сомнения и метасоматическое его происхождение. Как показал рентгенометрический анализ, размеры элементарной ячейки кубического пирита $a = 5,406 \pm 0,003 \text{ kX}$.

С. А. Юшко наблюдала пирит кубического габитуса в виде вкрапленности в хлоритизированной и серицитизированной породе [12]. Ею также было отмечено метасоматическое его происхождение и отсутствие штриховки на гранях куба.

2. Пирит пентагон-додекаэдрического габитуса наблюдался в прослоях интенсивно окварцованных и альбитизированных песчаниках в виде редкой, более менее равномерной вкрапленности, обычно приуроченной к направлению кливажа. Вокруг кристаллов нередко образуются кварцевые «тени», ориентированные по слоистости. Кроме того, пентагон-додекаэдрический пирит часто встречается в кварцевых и кварцкарбонатных, иногда с гематитом, жилках. Размеры кристаллов достигают 0,5 см, грани иногда покрыты очень тонкой штриховкой параллельно [001], другие простые формы, как правило, отсутствуют, за исключением редких, слабо выраженных граней куба и октаэдра. Параметр ячейки пентагон-додекаэдрического пирита не выходит за пределы нормальной величины $5,403 \pm 0,003 \text{ kX}$. Спектральный анализ не обнаружил сколько-нибудь заметных примесей. Полученные нами данные аналогичны наблюдениям других авторов. Так, С. А. Юшко [12] и В. А. Копчик [5] отмечают пентагон-додекаэдрический пирит преимущественно в кварцевых жилах и в открытых пустотах. В случае же нахождения пирита с халькопиритом, в пирите (по Юшко) присутствует примесь никеля, вызывающая, вероятно, увеличение размеров ячейки до $5,425 \pm 0,005 \text{ kX}$.

3. Октаэдрический пирит был встречен в зонах дробления и гидротермальной переработки (беризитизации) в песчаниках и в гранитах. Он отличается аномально светлым цветом и содержит, по данным спектрального анализа, ощущимую примесь кобальта. Параметр ячейки равен $5,421 \pm 0,002 \text{ kX}$. Размеры кристаллов до 0,5 см. Преобладающими, а иногда и единственными являются грани октаэдра. Но нередко вершины и ребра октаэдра

притуплены мелкими граньками других простых форм: (210), (211), (231), (421), а иногда и (316), (452) (таблица).

Границы октаэдра, как правило, имеют штриховку по трем направлениям, близким к направлению медианы равностороннего треугольника. Октаэдр, вообще говоря, является достаточно редкой простой формой пирита.

Октаэдрический пирит с Урала был описан С. В. Глинкой, который обнаружил, что штриховка на граниях октаэдра составляет угол, с медианами граней равный 10° [2]. С. А. Юшко отмечает, что октаэдрический пирит ассоциирует с карбонатом, галенитом и реже с арсенопиритом [12]. Кобальтистый пирит в октаэдрах известен в Пенсильвании в руднике Френч-крик.

Итак, пирит того или иного габитуса встречается в более или менее определенных условиях. Совпадения наших наблюдений с наблюдениями других исследователей не могут быть случайными. Они обусловлены взаимодействием постоянных геометрических факторов решетки растущих кристаллов с различными в разных случаях физико-химическими условиями внешней среды.

2. ПРИЧИНЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФОРМУ КРИСТАЛЛОВ

Форма кристалла определяется, с одной стороны, его структурой, т. е. геометрией решетки, а с другой — влиянием окружающей среды. В основе геометрических закономерностей частоты встречаемости тех или иных граней лежит известный закон Браве, согласно которому преобладающим развитием на кристалле пользуются те грани, ретикулярная плотность которых максимальна. Трудами И. Доннея и Д. Харкера [13], а также И. И. Шафрановского [10], учитывающих более полно симметрию плоских сеток, закон Браве был значительно расширен. Это позволило объяснить ряд кажущихся несоответствий его наблюдаемым фактам (например, отсутствие пинакоида на кварце). Однако и с такими уточнениями закон Браве остался приближенным, так как он еще не объясняет порядка распространенности граней некоторых минералов (пирит, гранат и др.).

Внешними факторами, влияющими на огранку кристаллов, являются степень пересыщенности растворов, температура и наличие сорасторвенных и механических примесей. Степень пересыщения растворов, как показал А. В. Шубников, достаточно резко влияет

<i>hkl</i>	φ	ρ	Качество	Размер грани
111	45°00'	54°44'	5	10
201	00°07'	63°29'	3	2
211	26°51'	65°42'	3	1
231	56°18'	74°54'	2	1
421	26°38'	77°29'	2	1
316	56°28'	33°31'	—	1
452	54°25'	77°59'	—	1

не только на скорость роста всего кристалла, но и особенно на относительные скорости роста граней, что приводит к развитию на кристалле одних форм вместо других [11]. Этую мысль еще раньше высказал И. И. Андреев [1], доказавший, что закон роста или растворения кристаллов совпадает с законом диффузии и выражается одним и тем же уравнением

$$\frac{dm}{dt} \cdot \frac{1}{s} = k (c_1 - c_2),$$

где $\frac{dm}{dt}$ — производная массы по времени;

s — поверхность кристалла;

k — коэффициент пропорциональности;

$(c_1 - c_2)$ — разность концентраций.

Следствием этого закона явился очень важный вывод о том, что концентрация насыщенного раствора различна для разных граней. Как показывает закон, при расчетах ретикулярной плотности нужно учитывать плотность каждого сорта атомов или ионов и ставить ее в соответствие с концентрацией в растворе того или иного компонента. Учтя эти особенности, В. И. Михеев и И. И. Шафрановский объяснили габитусные формы цинковой обманки [9].

По закону И. И. Андреева теоретически возможно такое положение, когда из множества граней растут только грани той простой формы, концентрация раствора для которых выше насыщенной, а другие могут и растворяться.

С физической точки зрения кристаллизация толкуется на основании принципа Гиббса — Кюри — Вульфа, согласно которому огранка равновесного кристалла отвечает минимуму его поверхностной энергии и скорости роста граней пропорциональны удельным поверхностным энергиям этих граней относительно маточного раствора ($dU = 0$ при $v = \text{const}$).

Таким образом, как закон Браве, так и закон И. И. Андреева и принцип Гиббса — Кюри — Вульфа с различных точек зрения определяют одну и ту же физическую сущность явления кристаллизации. Очевидно, имеется один общий закон, связывающий эти частные.

Роль температуры сводится главным образом к изменению абсолютной концентрации раствора и величин поверхностных энергий граней, а следовательно, и относительных концентраций. Очевидно, изменение концентрации насыщенного раствора для различных граней происходит непропорционально увеличению температуры, что приводит к резкому изменению относительных скоростей роста граней — к существенному искажению облика кристаллов [3].

Примеси как один из важных факторов учитывались еще Е. С. Федоровым. Однако в вопросе о роли примесей до сих пор нет единого мнения. Одни авторы склонны рассматривать изменение габитуса как следствие химического взаимодействия примеси с раствором, другие — указывают на важную роль физической стороны процесса (например, избирательная адсорбция). Понятно, рассматривать роль примесей надо с учетом их характера. Примеси по своему влиянию на габитус кристаллов разделяются на несколько типов:

1. Примеси, образующие химические соединения с растворами, были изучены П. А. Земятченским [4] и В. Д. Кузнецовым [6]. Механизм влияния состоит в том, что в результате химической реакции изменяется как концентрация раствора, так и степень диссоциации его, что, в свою очередь, оказывается на изменении поверхностной энергии граней кристалла.

2. Примеси, имеющие общий мотив ячейки с кристаллизующимся веществом и дающие с ним изоморфные смеси. При этом в зависимости от соотношения компонентов меняется не только форма кристалла, но и параметры его структуры.

3. Примеси, имеющие общий мотив решетки, но не образующие изоморфных смесей. В этом случае в зависимости от концентраций происходит кристаллизация одного или обоих соединений, но уменьшается поверхностная энергия той грани, которая имеет общий мотив с одной из плоских сеток примеси.

4. Механические примеси поверхностно активные и поверхностно неактивные. Влияние оказывают в основном только поверхностно активные примеси. Они избирательно адсорбируются на определенных гранях и уменьшают их поверхностную энергию, что также приводит к появлению новых граней [8].

3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МИНЕРАЛОВ С РЕШЕТКОЙ ХЛОРИСТОГО НАТРИЯ

1. Гетерополярные кристаллы минералов с решеткой хлористого натрия отличаются простотой структуры и связей, позволяющих легко вычислить внутреннюю и поверхностную энергию. Изучены они наиболее полно.

Ретикулярная плотность таких кристаллов следующая:

hkl	катион	анион
111	23,1	0
222	0	23,1
100	20	20
110	14,3	14,3
210	9,9	9,9

Октаэдр здесь находится в исключительных условиях. Поверхностная энергия его граней будет оставаться (в нормальных условиях) максимальной, несмотря на максимальную ретикулярную

плотность, а заряд будет менять знак. Этот вывод хорошо согла-
суется и с вычисленными (для нейтральной среды) поверхно-
стными энергиями. Для NaCl , по Я. И. Френкелю, $\sigma_{100} = 150$; $\sigma_{110} = 375$; $\sigma_{111} = 872 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2}$. Именно поэтому в нормальных условиях

никогда не наблюдается октаэдров на кристаллах галита. Если бы была известна зависимость изменения законов поверхностной энергии граней от условий среды, то можно было бы на основании принципа Гиббса — Кюри — Вульфа предсказывать и сами условия. Для комбинации куба и октаэдра такие вычисления проделал В. Д. Кузнецов [7]. Оказалось, что, если отношение $\frac{\sigma_{111}}{\sigma_{100}} > \sqrt{3}$, то кристалл может иметь только форму куба, а при $\frac{\sigma_{111}}{\sigma_{100}} < \frac{1}{\sqrt{3}}$ только форму октаэдра.

2. Гомополярные кристаллы с решеткой NaCl . Если в гетерополярных кристаллах вычисление внутренней и поверхностной энергии сводится так или иначе к суммированию зарядов отдельных ионов, то в случае гомополярных кристаллов, природа энергии межатомной связи которых еще недостаточно ясна, метода вычисления ее пока не существует. Известно, впрочем, что силы взаимодействия между атомами здесь изменяются по экспоненциальному закону и на расстоянии нескольких килоинков практически исчезают. Поэтому силу связи каждого атома, а следовательно, и свободную энергию (в нормальных условиях) можно характеризовать числом ближайших к атому соседей.

Для различных граней пирита число ближайших к атому железа соседей (по вычислениям В. А. Копчик) равно:

	100	210	111	421
для середины грани	3/3/3	3/4/6	3/3/8	3/3/6.

Несмотря на различия природы гетерополярной и гомополярной связи, анализ фактического материала показывает, что гомополярные кристаллы с решеткой NaCl кристаллизуются в тех же формах, что и гетерополярные (наличие 210 пирита вызвано присутствием спаренных атомов S_2^{2-}). Повидимому, геометрия решетки кристаллов является основным моментом в формировании их габитуса и кристаллизация пирита происходит таким же путем, как и кристаллизация NaCl , т. е. в нормальных условиях скорость роста октаэдрических граней максимальна и они зарастают. В случае же присутствия примесей кобальта, а иногда мышьяка, среди простых форм кристаллов пирита чаще других наблюдается октаэдр. Очевидно, кобальт и мышьяк, входя в решетку пирита, нарушают моноатомность слоев, понижают их симметрию и уменьшают в первую очередь поверхностную энергию октаэдрических плоских сеток.

Рост октаэдрических граней будет замедляться также и в случае избытка или недостатка одного из компонентов. При избытке обоих компонентов, как это имеет место у нас в железистых алевролитах, пирит кристаллизуется в форме кубов (ретикулярная плотность велика) с блестящими гладкими гранями. При недостатке серы и железа (окислительная среда — кварцевые жилы и окварцованные породы) будут образовываться пентагон-додекаэдры (ретикулярная плотность мала) или кубы с резкой штриховкой.

В заключение остановимся на вычислении отношений поверхностных энергий для случаев сочетания октаэдра, куба и пентагон-додекаэдра пирита. Вычисления по принципу Гиббса — Кюри — Вульфа при условии: $v = \text{const}$; $\frac{du}{dx} = 0$. Оказалось, что комбинация куба и пентагон-додекаэдра возможна только при отношении их поверхностных энергий $\sqrt{5} > \frac{\sigma_{100}}{\sigma_{210}} > 1,66$, а комбинация пентагон-додекаэдра и октаэдра — только в пределах отношения $0,54 < \frac{\sigma_{111}}{\sigma_{210}} < 3,2$. Так как поверхность или линейную длину тех или иных граней кристалла всегда можно измерить, то по приведенным формулам можно вычислить и отношение поверхностных энергий различных граней и в большей или меньшей мере характеризовать среду, в которой происходит кристаллизация.

В наших конкретных условиях для алевролитов (избыток серы и железа) $\frac{\sigma_{111}}{\sigma_{100}} = \sqrt{3}$, для окварцованных песчаников и кварцевых жил (недостаток серы) $\sigma_{111} = 0,6 \sigma_{100}$, для зон сульфидизации (примесь кобальта и мышьяка) $0,54 \sigma_{210} = \sigma_{111}$.

ВЫВОДЫ

1. Одним из основных факторов, влияющих на морфологию кристаллов пирита, является окислительная или восстановительная среда.

2. Октаэдрический пирит может образоваться под влиянием примеси кобальта.

3. В настоящей статье вычислено отношение величин удельной поверхностной энергии для различных морфологических типов пирита.

ЛИТЕРАТУРА

- Андреев И. И. Скорость роста и растворения кристаллов. Журнал Русского физико-химического о-ва, часть химическая, 1908, т. X, вып. 3.
- Глинка С. Ф. Описание октаэдрического кристалла пирита Урала. Сб. Минералогического каб. Московского университета за 1917 г., 1919.

3. Доливо-Добровольский В. В. Кристаллы шестиводного сернокислого магния (гексагидрита). Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1929, вып. I.
4. Земятченский П. А. Этюды по кристаллогенезису (I, II, III, IV). Записки императорской Академии наук, Физ.-мат. отд., 1909, т. 24, № 8; 1911, т. 30, № 3; 1914, т. 33, № 4; 1914, т. 33, № 5.
5. Копчик В. А. Пирит Саргадонского месторождения. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1949, № 2.
6. Кузнецов В. Д. Влияние примесей на кристаллизацию хлористого аммония. Журнал физической химии, 1935, № 6.
7. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела, т. I. Изд-во «Красное знамя», 1937.
8. Моккиевский В. А. и Кошурников Г. С. Влияние органических добавок на кристаллизацию галогенидов щелочных металлов. Журнал общей химии, 1948, № 4.
9. Михеев В. И. и Шафрановский И. И. О совпадении теоретических и генетических типов кристаллов цинковой обманки. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1948, № 4.
10. Шафрановский И. И. Формы кристаллов. Труды Института кристаллографии АН СССР, 1948, вып. 4.
11. Шубников А. В. Влияние степени пересыщения раствора на внешний вид выпадающих из него кристаллов. Известия Академии наук, 1913, стр. 817.
12. Юшко С. А. Микрохимические реакции, применяемые при изучении рудных минералов под микроскопом. Труды Института геологических наук АН СССР, 1940, вып. 19 (№ 3).
13. Доплай J. D. H. and Наркер D. Am. Mineral, 1937, № 22, p. 446—467.

*Ленинградский горный институт
Кристаллография, вып. 5, 1956 г.*

Ю. В. КАЗИЦЫН

ФЕРУТИТ И ДАВИДИТ

В 1950 г. Ф. А. Баннистером и И. Е. Хорном были опубликованы результаты исследования радиоактивного минерала (титаната железа, урана и редких земель), найденного незадолго до этого в районе Тэт, Мозамбик (Португальская Восточная Африка) [2].

Район этого месторождения сложен норитами и аортозитами допермского или, возможно, докембрийского возраста, превращенными вдоль зон дробления в эпидиориты и сассюриты. Радиоактивный материал встречен в карбонатно-скаполитовой породе совместно с рутилом, сフェном, магнетитом, ильменитом, апатитом и молибденитом. Минерал из Мозамбика образует сплошные скопления, но иногда наблюдается и в виде кристаллов, имеющих таблитчатую форму и размеры до 30—40 см. Кристаллы были измерены прикладным гoniометром, и минерал отнесен к дитригонально-пирамидальному классу 3m тригональной сингонии с отношением осей $a:c = 1:1,37$.

Твердость минерала 6, удельный вес 4,46, блеск полуметаллический. Он изотропен, отражательная способность 19,5. Возраст минерала по радиевому методу 565 млн. лет. Химический состав минерала из Мозамбика близок к давидиту из Радиум-Хилл, Олари Южной Австралии, встречающемуся в форме кубовидных кристаллов в позднем кварце гидротермального месторождения совместно с биотитом и богатой титаном, иногда радиоактивной железной рудой. Пересчет химического анализа минерала из Мозамбика приводит к эмпирической формуле типа $AB_3(O, OH)_7$, где A в основном Fe^{++} , B — Ti и Fe^{+++} . Подобную же формулу, по мнению Баннистера и Хорна, следует принять и для давидита.

Оба минерала метамиктны, и кристаллическая природа их выявляется лишь после продолжительного прокаливания. Рентгеновские исследования продуктов прокаливания в воздухе, водороде и азоте показывают наличие в основном одной и той же кристаллической фазы, помимо которой в первом случае при прокаливании на воздухе выделился рутил, а во втором — в водороде

ной атмосфере восстановилось железо до металлического состояния. Таким образом, значительные различия в условиях нагревания давидита и минерала из Мозамбика не приводят к существенной перестройке их структуры, что уже может служить указанием на возможность соответствия регенерированной структуры структуре первичной.

Нами будут рассматриваться лишь рентгенограммы минерала из Мозамбика и давидита, прокаленных в нейтральной атмосфере (азоте). Как показывает сравнение, различия в рентгенограммах столь велики, что говорить о тождественности этих минералов или даже считать один разновидностью другого [2] никак нельзя. Так, например, в порошковой рентгенограмме минерала из Мозамбика присутствуют весьма интенсивные линии, соответствующие межплоскостным расстояниям 3,12, 1,92, 1,64, 1,441, 1,251, 1,221, 1,118, 1,053 $k\text{\AA}$, которых нет в рентгенограмме давидита. В последней, в свою очередь, есть линии, отвечающие 1,417 и 1,035 $k\text{\AA}$, не наблюдающиеся в рентгенограмме минерала из Мозамбика. Остальные линии, хотя и являются общими для обеих рентгенограмм, но интенсивности их сильно варьируют. Большая сложность рентгенограммы минерала из Мозамбика свидетельствует, вероятно, об ином характере и о большей сложности его структуры, возможно, и о более низкой его симметрии. Ф. Баннистер и И. Хорн не смогли интерпретировать указанные выше различия в рентгенограммах минералов, сочли их «недостаточно существенными», что и привело их к неправильному выводу, заставив классифицировать минерал из Мозамбика как разновидность давидита.

При пересчете химического анализа минерала из Мозамбика и выводе формулы они группировали катионы по размерам. Такой пересчет основывается на правильных кристаллохимических соображениях и приводит, правда в достаточной мере случайно, к истинной формуле (табл. 1).

В табл. 1 ионные количества нами даны с точностью до третьего знака, вместо пяти, приведенных Баннистером и Хорном, так как химический анализ, положенный в основу пересчетов, выполнен лишь с точностью до десятых долей процента. Кроме того, ионный радиус аниона кислорода принят средним между величиной Гольдшмидта и величиной Н. В. Белова и Г. В. Бокия ($1,32 + 1,36 : 2 = 1,34 \text{ } k\text{\AA}$) [1]. Мы попытались проиндексировать рентгенограммы минерала из Мозамбика и давидита, вскрыть причину глубоких различий в дифракционной картине этих сходных по составу минералов и решить вопрос об их конституции. При индексировании минерала из Мозамбика исходными данными служили гониометрические наблюдения, выявившие аналогию его с ильменитом, для которого отношение осей $a : c = 1 : 1,37$. Предполагалось, что структура минерала построена по принципу плотнейшей укладки (может быть слегка искаженной) анионов кислорода,

Таблица 1

Ионы	Ионные радиусы	Ионные количества	Ионные отношения	Средние значения ионных радиусов
Si ⁴⁺	0,39	0,001		
Ti	0,64	0,682		
Cr	0,64	0,002		
V	0,65	0,015		
Fe ³⁺	0,67	0,159		
U ⁶⁺	0,76	0,038		
Fe ²⁺	0,80	0,199		
Zr	0,82	0,003		
Na ⁺	0,98	0,005		
Ca ²⁺	1,01	0,005		
Th	1,06	0,0003		
Ce...	1,00	0,034		
OH ⁻	1,34	0,006		
O ²⁻	1,34	1,999	7,00	1,34

в тетраэдрических пустотах которой расположены катионы типа *B*, а в октаэдрических — типа *A*. Ионные радиусы катионов *B* и *A* были найдены как взвешенные средние арифметические из величин ионных радиусов всех составляющих их катионов. Предполо-

жение о характере распределения катионов по пустотам было сделано на основании ионных радиусов: $R_A = 0,83 \text{ kX}$, $R_B \pm 0,65 \text{ kX}$. Кроме того, такое допущение, как показано ниже, лучше согласуется с экспериментальными данными. При формировании плотнейших упаковок катионы в основном распределяются по пустотам соответственно своим размерам: более крупные в октаэдрических, а относительно мелкие в тетраэдрических пустотах. При этом обычно размеры катионов не строго соответствуют размерам пустот, которые в результате сужаются или растягиваются. Величину такого «растягивания» не трудно учесть из простых геометрических построений.

Если r_a — ионный радиус аниона, r_k — радиус катиона, то длина ребра первичного тетраэдра

$$a_{\text{тет}} = (r_a + r_k) 2 \sqrt{\frac{2}{3}},$$

а длина ребра октаэдра соответственно:

$$a_{\text{окт}} = (r_a + r_k) \sqrt{2}.$$

В нашем случае

$$a_{\text{окт}} = (1,34 + 0,83) \sqrt{2} = 3,08 \text{ kX}$$

и

$$a_{\text{тет}} = (1,34 + 0,65) 2 \sqrt{\frac{2}{3}} = 3,25 \text{ kX}.$$

Учитывая, что обычно только часть тетраэдрических и октаэдрических пустот заселена (в нашем случае соответственно $\frac{3}{14}$ и $\frac{1}{7}$), следует уменьшить эти значения пропорционально количеству свободных мест. Получим для стороны тетраэдра $2,74 \text{ kX}$ и октаэдра $2,80 \text{ kX}$. Приведя эти величины к среднему, т. е. умножив на относительное количество октаэдрических $\left(\frac{1}{3}\right)$ и тетраэдрических $\left(\frac{2}{3}\right)$ пустот в структуре, получим окончательное значение длины ребра первичных октаэдра и тетраэдра, строящих кристаллическую решетку минерала $2,78 \text{ kX}$.

Если изложенные выше рассуждения относительно соответствия исходной и регенерированной структур, наличия плотнейшей гексагональной упаковки и аналогии о соотношении осей с ильме-

нитом справедливы, то рентгенограмма минерала из Мозамбика должна индицироваться в следующих параметрах гексагональной ячейки $a_0 = 2,78 \text{ n kX}$ и $c_0 = 2 a_0, 1,37 \text{ kX}$, где n — целое число.

Действительно, рентгенограмма минерала из Мозамбика индицируется при параметрах, кратных стороне первичного тетраэдра или его высоте: при $n = 3$ или $n = 3 \sqrt{\frac{2}{3}}$ (табл. 2). В первом случае $a_0 = 8,34 \text{ kX}$; $c_0 = 22,8 \text{ kX}$; во втором — $a_0 = 6,8 \text{ kX}$, $c_0 = 18,6 \text{ kX}$. При иных n или иных a и c рентгенограмма не индицируется вовсе или индицируется несравненно хуже. Из двух указанных значений параметров оба позволяют проиндицировать порошковую минерала из Мозамбика, а следовательно, и порошковую минерала из Мозамбика, которая отличается лишь меньшим числом и иной интенсивностью линий. Но все же при втором варианте ($a_0 = 6,8 \text{ kX}$ и $c_0 = 18,6 \text{ kX}$) не находят себе индексов три линии, интенсивность которых весьма мала (в десятибалльной шкале может быть оценена как 1). Поэтому первый вариант выбора осей, повидимому, следует предпочесть второму.

Противоречий не наблюдается и при сопоставлении гониометрических и рентгеновских наблюдений.

Морфологическими наблюдениями и гониометрическими изменениями установлено, что наиболее развитыми формами на кристаллах являются пинакоид (0001) и призма (1230). На рентгенограмме минерала из Мозамбика межплоскостные расстояния, отвечающие плоским сеткам с такими символами, присутствуют и имеют максимальную интенсивность: (0008) $I = 5$, (0009) $I = 4$, (00012) $I = 10$, (00014) $I = 10$, (1230) $I = 8$. Это является лишним подтверждением правильности индицирования и тождественности исходной и регенерированной структур.

В то же время обращает на себя внимание наличие значительных отклонений, вычисленных от наблюденных величин межплоскостных расстояний и соответственно частных значений параметров от средних (см. табл. 2). Подобное явление могло быть вызвано либо неправильным выбором параметров, либо отклонением структуры минерала из Мозамбика от гексагональной в сторону понижения ее симметрии, либо, наконец, низким качеством рентгеновых данных. Наиболее вероятной причиной следует считать последнюю, так как при любых иных параметрах рентгенограмма индицируется хуже или не индицируется совсем. Индицирование в предположении псевдогексагональной (ромбической) ячейки не улучшает положения — отклонения остаются прежними.

Не задаваясь целью полного определения структуры минерала из Мозамбика и давидита, т. е. определения точного положения ионов, проведем некоторый анализ их рентгенограмм, чтобы в общих чертах установить характер решетки и выяснить причину раз-

Таблица 2

Минерал из Мозамбика						Давидит	
I	$d_{\text{набл}}$	hkl	a_0	c_0	$d_{\text{вычисл}}$	$d_{\text{набл}}$	I
1	4,1	1121	8,3	22,8	4,1	—	
1	3,7	1123, 2020	8,39	23,1	3,62	3,65	5
5	3,35	1124	8,35	22,7	3,37	3,36	5
8	3,12	1125	8,43	23,1	3,08	—	—
2	3,02	2024	8,26	22,7	3,04	3,04	1
2	2,97	1017	8,34	22,8	2,97	—	
5	2,87	0008	—	22,9	2,86	2,90	10
5	2,82	2025	8,31	22,8	2,82	—	—
8	2,72	2130	8,32	—	2,73	2,72	10
1	2,63	2132	8,27	22,6	2,65	—	—
4	2,52	0009	—	22,7	2,53	2,52	8
3	2,46	2134	8,33	22,8	2,46	—	—
3	2,42	3030	8,34	22,8	2,42	2,32	1
5	2,24	1236	8,42	23,1	2,24	2,23	5
4	2,13	3035	8,34	22,8	2,13	2,13	4
10	1,92	3143	8,27	22,8	1,93	—	—
2	1,86	2139	8,35	22,8	1,86	1,86	5
4	1,80	4040	8,32	—	1,80	—	—
1	1,78	4042	8,33	22,8	1,78	1,79	9
5	1,71	3147	8,36	22,9	1,71	1,71	9
10	1,64	3252	8,34	22,8	1,64	—	—
1	1,62	3253	8,35	22,7	1,62	—	—
5	1,51	2249	8,34	22,8	1,61	1,60	5
4	1,57	4151	8,33	22,8	1,57	—	—
1	1,54	4153	8,33	22,8	1,54	1,52	7
4	1,51	4154	8,30	22,7	1,52	1,50	7
4	1,463	4049	8,30	22,70	1,463	1,461	7
8	1,441	5051	8,34	22,85	1,440	—	—
3	1,370	3363	8,36	22,9	1,370	1,417	7
9	1,251	5165	8,36	22,9	1,249	—	—
9	1,221	3369	8,36	22,9	1,221	—	—
3	1,126	51610	8,34	22,8	1,126	—	—
8	1,118	4377	8,36	22,9	1,119	—	—
7	1,075	4379	8,34	22,8	1,073	1,074	5
10	1,053	43710	8,34	22,8	1,053	1,035	5

личия дифракционных картин этих весьма сходных по химическому составу минералов. В основе структуры минерала из Мозамбика, как указано выше, лежит гексагональная плотнейшая укладка анионов кислорода, в пустотах между которыми (октаэдрическими и тетраэдрическими) размещаются катионы типа *A* и *B* в соответствии с их радиусом. Если изобразить два анионных слоя структуры (рис. 1) и заполнить катионами типа *A* — $\frac{1}{7}$

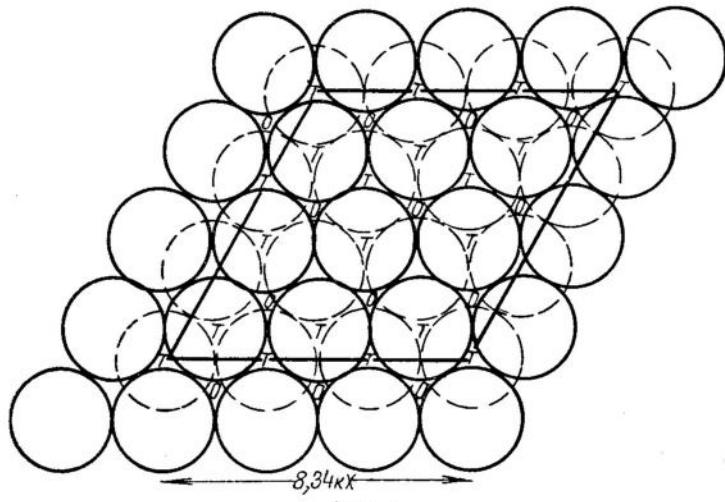


Рис. 1

октаэдрических и катионами типа *B* — $\frac{3}{14}$ тетраэдрических пустот, то будет видно, что на рентгенограмме должны присутствовать отражения, соответствующие плоским сеткам, проходящим через пустоты обоих сортов. Действительно, такие рефлексы на рентгенограмме имеются: $3,7 \text{ kX } I = 1$ и $2,42 \text{ kX } I = 3$. Причем интенсивность отражений, характеризующих тетраэдрические позиции катионов, несколько выше, так как они заселены гуще. В тоже время интенсивность отражения от плоских сеток ($hh2hl$), проходящих одновременно через пустоты обоих сортов, оказывается максимальной, например $(1125) 3,12 \text{ kX } I = 8$.

Таким образом, принятая химическая формула минерала из Мозамбика не противоречит рентгеноструктурным данным.

Следующим шагом в характеристике структуры минерала из Мозамбика является установление слойности плотнейшей укладки. Если структура многослойная, то число слоев по [0001] будет

$$n = \frac{c}{a} \sqrt{\frac{2}{3}}, \text{ если же структура представляет собой простую}$$

плотнейшую гексагональную упаковку, то ось c должна быть кратна высоте «первичного» тетраэдра, т. е. $c = \frac{a}{m} \sqrt{\frac{2}{3}}$, где m — число простых слоев по a .

В нашем случае имеет место именно положение: $n = \frac{cm}{a} \sqrt{\frac{3}{2}} = 2,74 \cdot 3 \sqrt{\frac{3}{2}} = 10$, т. е. простая гексагональная плотнейшая упаковка, сложенная по [0001] десятью слоями тетраэдров. Полная расшифровка структуры минерала из Мозамбика требует специальных исследований и не входит в задачу настоящей статьи, где выясняется лишь характер решетки минерала из Мозамбика и ее отличия от решетки давидита.

Порошкограмма давидита, как это следует из табл. 2 и 3, индицируется в тех же осях, что и порошкограмма минерала из Мозамбика, но в первой интенсивность отражений

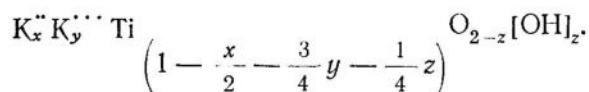
Таблица 3

I	$d_{\text{набл}}$	hkl	a	c	$d_{\text{вычисл}}$
5	3,65	111	5,4	13,2	3,69
5	3,36	112	5,48	13,5	3,36
1	3,04	—	—	—	—
10	2,90	113	5,43	13,37	2,90
10	2,72	200	5,44	—	2,72
8	2,52	202	5,44	13,40	2,52
1	2,32	203	5,44	13,37	2,32
5	2,23	006	—	13,38	2,23
4	2,13	213	5,43	13,36	2,13
5	1,86	222	5,47	13,47	1,85
9	1,79	215, 301	5,42	13,31	1,79
9	1,71	311	5,45	13,43	1,70
5	1,60	313	5,43	13,35	1,602
7	1,52	314	5,43	13,31	1,526
7	1,50	321	5,44	13,42	1,497
7	1,461	322	5,41	13,30	1,469
7	1,417	208	5,43	14,34	1,417
5	1,074	432	5,44	13,38	1,072
5	1,035	434	5,45	13,40	1,032

от плоских сеток типа $2nO\bar{2}nO$ сильно завышена, а отражения от плоских сеток типа $nOnO$ отсутствуют. Повидимому, в давидите все катионы размещены по иному закону или в пустотах одного сорта, вероятнее всего только в октаэдрических, т. е. находятся

в эквивалентных положениях. Следовательно, химическая формула, выведенная для минерала из Мозамбика, к давидиту не применима. В формуле давидита должен быть отображен факт изоморфного замещения титана двух- или трехвалентными катионами, а кислорода — гидроксильной группой, хотя гидратация происходит, вероятно, уже после перехода минерала в метамиктное состояние.

Учитывая, что октаэдрические позиции титана характерны для двуокиси титана TiO_2 (рутин, брукит, анатаз) и производя указанные выше замещения в этой формуле, получаем формулу давидита



Если пересчитать химический анализ давидита, освободив его предварительно от того произвола, который, по их же признанию, внесен Баннистером и Хорном, то легко убедиться, что предложенная схема формулы хорошо согласуется с аналитическими данными (табл. 4). При этом величины коэффициентов оказываются следующими: $x = 0,26$; $y = 0,23$; $z = 0,08$.

Основными структурными единицами давидита являются кислородные октаэдры с перечисленными катионами внутри. Индицирование порошкограммы давидита затруднено отсутствием гониометрических измерений кристаллов и морфологических наблюдений (за исключением краткого указания о кубовидном их облике). Моментом, облегчающим задачу, является отмеченная выше аналогия состава давидита с двуокисью титана, что позволяет предполагать наличие структуры рутилового, брукитового или анатазового типа, т. е. плотнейшей гексагональной, кубической или многослойной упаковки.

Вычисление длины ребра первичного октаэдра, произведенное с учетом количества всех ионов, дает величину порядка $2,72 \text{ к}X$. Если взять величину a кратной этому значению, например $5,44 \text{ к}X$, то легко можно установить, что порошкограмма давидита хорошо индицируется при отношении $\frac{a}{c} = \frac{1}{2,45}$, т. е. при структуре брукитового типа (плотнейшей кубической). Величина c оказывается равной $c_0 \approx a_0 = 13,4 \text{ к}X$. При таких параметрах рентгенограмма давидита индицируется полностью (см. табл. 3) за исключением одной весьма слабенькой линии $3,04 \text{ к}X$. Средние значения параметров, вычисленные из всех наблюденных межплоскостных расстояний: $a = 5,435 \text{ к}X$ и $c = 13,37 \text{ к}X$.

Не исключена возможность, что найденные величины параметров элементарной ячейки давидита не отвечают действительности, но во всяком случае они должны быть им кратными.

Таблица 4

Оксиды	Весо-вые про-центы	Ионы	Радиусы ионов	Ион-ные отно-шения	На два аниона	Сумма ионов	Сумма зарядов
TiO ₂	53,8	Ti ⁴⁺	0,64	0,673	0,654	2,63	
Fe ₂ O ₃	12,9	Fe ³⁺	0,67	0,162	0,158	0,474	
U ₃ O ₈	4,6	U ⁶⁺ (+Pb ³⁺)	0,76	0,021	0,020	0,12	
Ce ₂ O ₃	8,2	Ce ³⁺	0,99-1,18	0,050	0,049	1,139	0,147
FeO	15,8	Fe ²⁺	0,79	0,223	0,217	0,434	3,89
MgO	0,6	—	0,75	0,015	0,015	0,030	
CaO	1,5	Ca ²⁺	1,01	0,027	0,026	0,052	
PbO	1,1	Включено в ионное количество урана					
H ₂ O	1,5	O ²⁻	1,34	1,974	1,919	3,838	
—	—	OH ⁻	1,34	0,083	0,081	0,081	3,92

Подводя итог изложенному, можно сделать следующие выводы. Минерал из Мозамбика и давидит являются различными минералами сложной и еще недостаточно изученной группы титанатов железа, урана и редких земель. Поэтому целесообразно минерал из Мозамбика считать самостоятельным и дать ему название по химическому составу — ферутит.

Давидит и ферутит, несомненно, являются не единственными представителями этой интересной минеральной группы, а Радиум Хилл и Тэт, Мозамбик — не единственными местами их находки. Теоретически возможны минералы, в структурах которых соотношение заселенных и свободных октаэдрических и тетраэдрических пустот будет иным или вместо простых гексагональной и кубической упаковок будут иметь место многослойные упаковки.

Факт индицирования ферутита в отношениях осей, найденных из гониометрических измерений, свидетельствует, вероятно, о тождественности имевшейся до метамиктного распада структуры и структуры, восстановленной путем нагревания в нейтральной атмосфере.

Следует отметить, что природа метамиктности до сих пор окончательно не выяснена. Обстоятельная работа А. Пабста, суммируя практически все воззрения по этому вопросу, также не дает определенного ответа [3]. Принято считать, что при метамиктном распаде минералов разрушается их кристаллическая решетка, а при прокаливании в результате протекающих в веществе реакций происходит рекристаллизация. О разрушении кристаллической решетки судят по отсутствию рентгеновской дифракции, а о химических реакциях — по наблюдающейся обычно экзотермии. Но, если принять во внимание, что активными в отношении рентгеновских лучей являются лишь электронные облака атомов, то можно предположить, что в основе метамиктности лежит не разрушение кристаллической решетки минерала, а искажение конфигурации электронных облаков атомов, вызываемое «внедрением» в них электрически активных продуктов радиоактивного распада. При нагревании минерала в результате возбуждения атомов паразитные заряды «изгоняются» из орбит атомов, нейтрализуются (что приводит к «самораскаленнию») и структура минерала восстанавливается в ее прежнем виде. Если приведенные соображения верны, то восстанавливать структуру метамиктных минералов, очевидно, можно не только нагреванием, но и другими способами, лишь бы удалось возбудить атомы и «снять» поляризацию, наведенную радиоактивным распадом.

Выводом из приведенных соображений, высказанных здесь в качестве постановки вопроса, является необходимость восстановления прежней структуры метамиктных минералов путем нагревания. Причем это может быть осуществлено, если минералы не диссоциируют при нагревании и если процессы гидратации — следствие нарушения электронейтральности структур метамиктных минералов — еще не привели к изменению состава минералов.

ВЫВОДЫ

1. Ферутит (минерал из Мозамбика) является самостоятельным минералом, близким к давидиту, но существенно отличается от него конституцией.

2. Ферутит относится к гексагональной сингонии. Его структура характеризуется плотнейшей гексагональной упаковкой анионов кислорода, тетраэдрические и октаэдрические пустоты в которой заселены в отношении 3 : 2. Параметры его ячейки $a_0 = 8,33 \text{ к}X$; $c_0 = 22,8 \text{ к}X$.

3. Давидит относится к тетрагональной сингонии (может быть псевдокубический), обладает плотнейшей кубической упаковкой, около половины пустот которой заселено катионами. Параметры его ячейки $a_0 = 5,74 \text{ \AA}$; $c_0 = 13,37 \text{ \AA}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов И. В. и Бокий Г. Б. Современное состояние кристаллохимии и ее ближайшие задачи. Первое совещание по кристаллохимии. Изд. АН СССР, 1954.
2. Bannister M. A. a. Horne I. E. Min. Mag., 1950, № 29, p. 101.
3. Pabst A. Min. Mag., 1951, № 29, p. 435.

Ленинградский горный институт
Кристаллография, вып. 5, 1956 г.

И. В. ЯВОРСКИЙ

О РАЗНОВИДНОСТИХ СТРУКТУРЫ АЛМАЗА

За последние годы появилось много работ, посвященных обсуждению вопроса о возможных разновидностях структуры алмаза [1].

Однако ни один из авторов этих работ не основывался в своих исследованиях на зонной теории строения вещества [2], считая, повидимому, что эта теория не в состоянии обосновать предполагаемое разнообразие структур алмаза. В самом деле, по классическим представлениям [3], первая зона алмаза (рис. 1, а) ограничена плоскостями, параллельными плоскостям (111). Вершины этой двойной пирамиды отстоят от центра зоны на $\frac{3}{2a}$, где a — постоянная элементарной ячейки алмаза.

Объем зоны $V_z = \frac{9}{2a^3}$. Атомный объем $V_a = \frac{a^3}{8}$. Для заполнения зоны необходимо в среднем по $\frac{9}{8}$ электрона от каждого атома [3].

Многогранник (рис. 1, б) образован плоскостями, параллельными плоскостям (110). Внутри этого многогранника можно выделить другой многогранник (рис. 1, в) — ромбододекаэдр, который и ограничивает вторую зону (объем между ромбододекаэдром и двойной пирамидой).

Объем второй зоны $V_z = \frac{23}{2a^3}$. Для заполнения зоны необходимо в среднем по $\frac{23}{8}$ электрона на атом.

Обе зоны вмещают по четыре электрона на атом.

Каким образом получены указанные выше многогранники — зоны?

Структура K — пространства определяется структурой F^2 — тела, т. е. обратной решеткой, вес узлов которой пропорционален квадрату структурной амплитуды.

Плоскости, перпендикулярные векторам обратной решетки и делящие их пополам, образуют многогранники — зоны Бриллюэна [3].

Итак, по зонной теории для алмаза существует только одна форма многогранника, ограничивающего зону, внутри которой размещаются 32 электрона восьми атомов алмаза.

Возможны и другие формы зон Бриллюэна в алмазе, если принять во внимание многократные «отражения» электронов

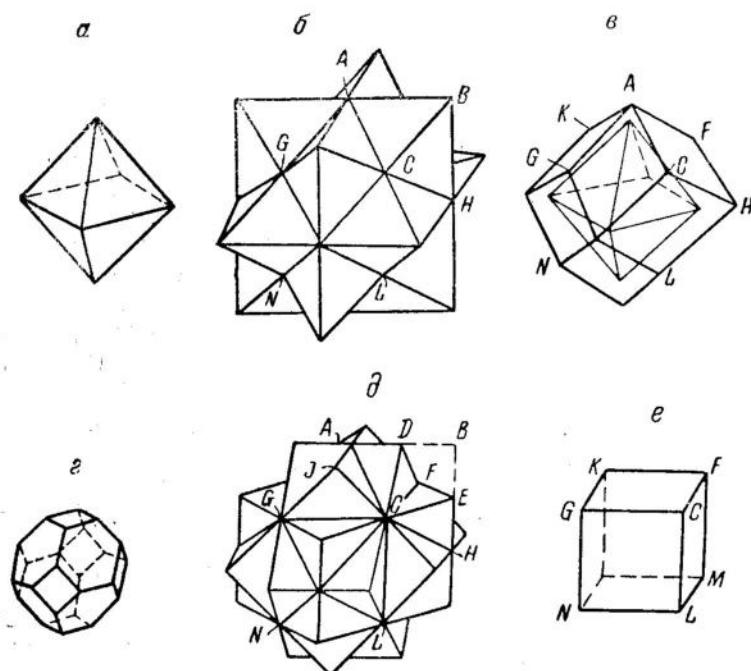


Рис. 1. Зоны Бриллюэна в алмазе:

а, б, в — по классическим представлениям; г, д, е — при учете вторичных дифракционных максимумов

от атомных плоскостей. Интенсивность этих вторичных максимумов обычно мала. Однако в алмазе рядом исследователей наблюдалась запрещенные максимумы типа $\langle 222 \rangle$. Как показал Рейнингер, эти максимумы могут быть объяснены как вторичные «отражения» [4].

Когда узлы обратной решетки 222 и 331 лежат одновременно на сфере интерференции, плоскость 331 расположена так, что «отраженный» от нее луч вторично отражается от плоскости 111 и идет в направлении $\langle 222 \rangle$.

Ненаблюдаемость других типов запрещенных максимумов в алмазе еще не означает, что следует пренебрегать ими.

Интенсивность вторичных максимумов может оказаться сравнимой с интенсивностью первичных максимумов ввиду следующих обстоятельств:

1. В идеальном кристалле интенсивность максимумов пропорциональна величине структурной амплитуды, а не ее квадрату. Поэтому относительные интенсивности «сильных» и «слабых» рефлексов нивелируются. Нивелирование быть может и обусловлено наличием вторичных максимумов, число которых в $(m+1)$ раз больше числа (m) первичных максимумов. Алмаз наиболее близок к образу идеального кристалла.

2. При рассмотрении движения электронов в кристалле нет оснований отдавать предпочтение какому-то одному направлению — «первичному пучку». Все направления движения электронов можно считать равноправными «первичными пучками», источник которых находится внутри кристалла. Это обстоятельство еще более нивелирует относительные интенсивности дифракционных максимумов.

Таким образом, при движении электронов внутри кристалла все «отражения» могут осуществляться, причем интенсивность первичных и вторичных максимумов не может значительно отличаться друг от друга.

Поэтому запрещенные максимумы типа $\langle 200 \rangle$ следует учитывать при построении зон Бриллюэна в алмазе.

Если узлы 200 и 311 лежат одновременно на сфере интерференции, плоскость 311 расположена так, что «отраженный» от нее луч вторично отражается от плоскости 111 и идет в направлении $\langle 200 \rangle$.

Такое же вторичное отражение от плоскости 111 возникает и при одновременном расположении на сфере интерференции пар узлов — 020 и 131 , 002 и 113 .

Максимумы $\bar{2}00$, $\bar{0}20$, $0\bar{0}2$ осуществляются аналогичным способом:

$$\begin{array}{c} \bar{2}00 \\ -\bar{3}11 \\ \cdot 111 \end{array} \quad \begin{array}{c} \bar{0}20 \\ -131 \\ \cdot 111 \end{array} \quad \begin{array}{c} 0\bar{0}2 \\ -113 \\ \cdot 111 \end{array}$$

Обратная решетка алмаза становится геометрически тождественной обратной решетке гранецентрированной структуры (рис. 2). Поэтому первая зона — не двойная пирамида (рис. 1, а) с квадратным основанием $(V_s = \frac{9}{2a^3})$, а четырнадцатигранник (рис. 1, г), объем которого $V_s = \frac{4}{a^3}$.

Следовательно, в первой зоне размещается один электрон на атом, а не $\frac{9}{8}$ электрона на атом.

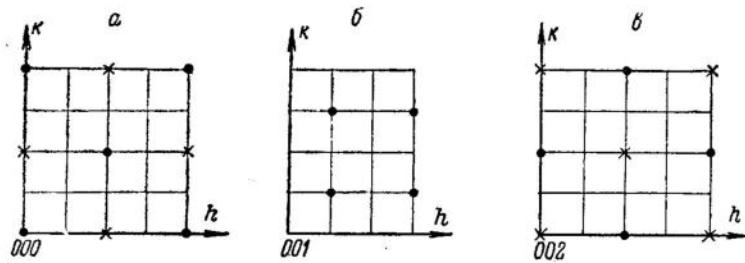


Рис. 2. Обратная решетка алмаза:

а — иулевая; *б* — первая; *в* — третья плоскости. Крестиками помечены узлы, которые необходимо учитывать из-за вторичных максимумов

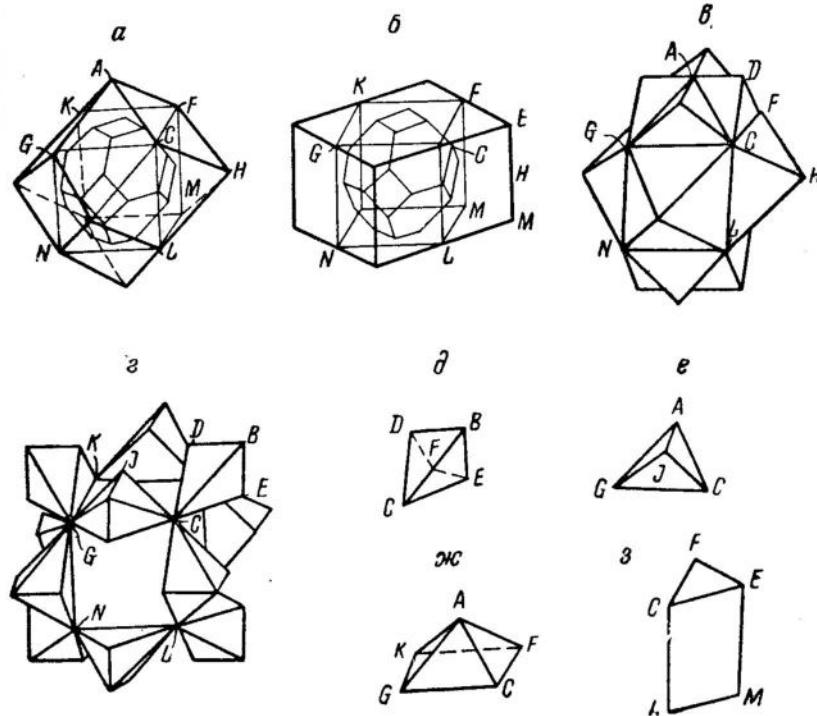


Рис. 3. Пояснение деталей зон Бриллюэна в алмазе

Следующая зона имеет более сложную форму (рис. 1, *д*). Этот многогранник образован совмещением центров трех одинаковых тетрагональных призм (рис. 3, *б*), повернутых относительно друг друга на 90° . Внутри многогранника можно выделить несколько других многогранников более простой формы.

Второй зоной следует считать пространство между кубом со стороной $\frac{2}{a}$ и четырнадцатигранником (рис. 3, *а*, *б*). Число электронов в зоне $n = 1 \frac{\text{электрон}}{\text{атом}}$.

Объем третьей зоны $V_3 = \frac{8}{a^3}$, число электронов в зоне $n = 2 \frac{\text{электрон}}{\text{атом}}$.

Форма третьей зоны может быть различной, так как имеется много многогранников одинакового объема — $\frac{16}{a^3}$, например:

- 1) ромбододекаэдр (рис. 3, *а*);
- 2) тетрагональная призма (рис. 3, *б*); на четырех гранях куба (рис. 1, *е*) располагаются трехгранные призмы (рис. 3, *ж*);
- 3) многогранник (рис. 3, *в*), в котором на двух противоположных гранях куба (рис. 1, *е*) размещаются двойные «крыши» вместо пирамид (рис. 3, *ж*); объем двух крыш — четырех пирамидок (рис. 3, *е*) — равен объему призмы с квадратным основанием (рис. 3, *ж*);
- 4) многогранник (рис. 1, *д*) с удаленными пирамидами с квадратным основанием (рис. 3, *ж*);
- 5) многогранник (рис. 3, *г*), в котором вместо двойных крыш и пирамид на гранях куба (рис. 1, *е*) расположены шестиугранники (рис. 3, *д*), соприкасающиеся с кубом по его ребрам.

Форма трех возможных многогранников — третьих зон (рис. 3, *а*, *1*, *д*, и 3, *г*) соответствует симметрии куба.

Форма двух остальных многогранников (рис. 3, *б*, *в*) соответствует тетрагональной симметрии.

Наиболее вероятной формой третьей зоны является ромбододекаэдр, так как наиболее удаленная точка зоны (точки типа *A*, рис. 3, *а*) расположена на расстоянии $\frac{2}{a}$ от центра зон.

Во всех остальных возможных формах третьих зон наиболее удаленные точки располагаются либо на расстоянии $\frac{\sqrt{5}}{a}$ (точки типа *E*, рис. 3, *б*; точки типа *D*, рис. 3, *в* и 1, *д*), либо на расстоянии $\frac{2\sqrt{2}}{a}$ (точки типа *B*, рис. 3, *г*).

Очевидно, чем дальше точки зоны отстоят от центра, тем больше и энергия соответствующих электронов.

Приведенные построения зон алмаза позволяют сделать следующий вывод:

1. Алмаз является хорошим изолятором, так как обобществленные электроны образуют устойчивые восьмерки.

В первой зоне (кубооктаэдре) располагаются восемь электронов. Во второй (объем между кубом и кубооктаэдром) — также восемь электронов. В третьей — находится 16 электронов, однако также можно выделить две группы по восемь электронов.

Ромбододекаэдр (рис. 3, а). В трех пирамидах с квадратным основанием (рис. 3 ж) — восемь электронов.

Тетрагональная призма (рис. 3, б). В двух трехгранных призмах (рис. 3, з) — восемь электронов.

Многогранник (рис. 3 в). В трех пирамидах (рис. 3, ж) — восемь электронов.

Многогранник (рис. 1, д). В двенадцати пирамидах (рис. 3, е) — восемь электронов.

Многогранник (рис. 3, г). В шести шестигранниках (рис. 3, д) — восемь электронов.

2. Возможны три типа структуры алмаза.

ЛИТЕРАТУРА

- Нардов В. В. О четырех разновидностях структуры алмаза. Ученые записки ЛГУ, серия геологических наук, 1954, № 178, вып. 4.
- Вильсон А. Квантовая теория металлов. ОГИЗ—ГИТТЛ, 1941.
- Блохин М. А. Физика рентгеновских лучей. ГИТТЛ, 1953.
- Джеймс Р. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей. ИЛ, 1950.

ТОНКАЯ СТРУКТУРА ПРОСТРАНСТВА ОБРАТНОЙ РЕШЕТКИ

Методика определения геометрии кристалл-дифракционной картины с помощью обратной решетки общезвестна. Трудно переоценить значение этого чрезвычайно удобного способа расчета, позволяющего без трудаемых вычислений наглядно изобразить поле главных дифракционных максимумов.

Однако в ряде случаев взаимодействие ионизирующих излучений с кристаллами приводит к образованию более сложной дифракционной картины, трактовка которой вызывает затруднения. Это замечание относится к появлению так называемых «лишних», или «запрещенных», рефлексов. Можно показать, что динамическое взаимодействие рентгеновских лучей с кристаллом является одной из причин появления таких рефлексов.

Рациональное использование метода обратной решетки для расчета рентгенограмм может быть достигнуто только после уточнения образа обратной решетки. Это уточнение и является целью настоящей работы.

1. ГЕОМЕТРИЯ ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ С КРИСТАЛЛОМ

Как известно, привлечение обратной решетки к решению дифракционных задач было обусловлено изящным геометрическим толкованием закона Вульфа-Брэгга, записанного в векторной форме [1]

$$\vec{H} = \frac{\vec{\sigma} - \vec{\sigma}_0}{\lambda}, \quad (1)$$

где \vec{H} — вектор обратной решетки;
 λ — длина волны применяемого излучения;
 $\vec{\sigma}_0$ и $\vec{\sigma}$ — единичные векторы первичной и дифрагированной волн.

Вывод этого закона основан на кинематической теории интерференции. Следовательно, эффекты динамического взаимодействия при этом не учитывались. Один из таких эффектов — взаимодействие дифрагированного пучка с кристаллом — наблюдался еще Рейнингером при исследовании геометрии дифракционной картины от алмаза [2].

Следует уточнить образ обратной решетки, указав правила нахождения направлений максимумов, возникающих при многочтных «отражениях».

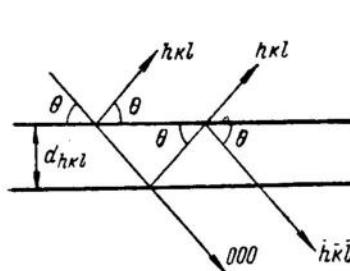


Рис. 1. Дифрагированная волна в кристалле:
000 — первичный пучок; hkl — дифрагированный; $h\bar{k}\bar{l}$ — вторичный максимум

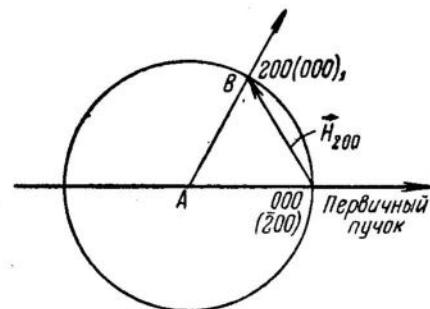


Рис. 2. Вторичные «отражения». Узел 200 — вспомогательный нуль обратной решетки. Вторичный максимум 200 — ослабляет первичный пучок

Рассмотрим поведение дифрагированной волны в кристалле. Максимум с индексами hkl , распространяясь в кристалле в результате двойного «отражения», возбуждает максимум с индексами ($o - h, o - k, o - l$), т. е. $h\bar{k}\bar{l}$ (рис. 1).

Максимум $h\bar{k}\bar{l}$ ослабляет первичный пучок 000, так как соответствующая разность фаз равна π [3]. Могут образоваться и другие вторичные «отражения» в результате взаимодействия максимума hkl как первичного пучка с кристаллом.

Разберем конкретный пример (рис. 2).

Положим, что выполнено условие для возникновения максимума 200. По построению нуль обратной решетки расположен на направлении первичного пучка 000.

Для дифрагированной волны, если надо учесть возможные производные и многократные максимумы, нуль обратной решетки также должен располагаться на направлении ее распространения, т. е. узел 200 превращается в узел $(000)_1$.

Поэтому необходимо изобразить две сдвинутые относительно друг друга обратные решетки: одну (основную) для первичного пучка (000) , другую (вспомогательную) для дифрагированного

$(200 \rightarrow 000_1)$ (рис. 3). Величина сдвига равна длине вектора H_{200} . Из вспомогательного нуля — узла 200 — описываем сферу радиуса $\frac{1}{2}$. Внутри этой новой сферы ограничения по общим правилам вычерчиваем вспомогательную обратную решетку, все плоскости которой должны располагаться параллельно плоскостям основной обратной решетки.

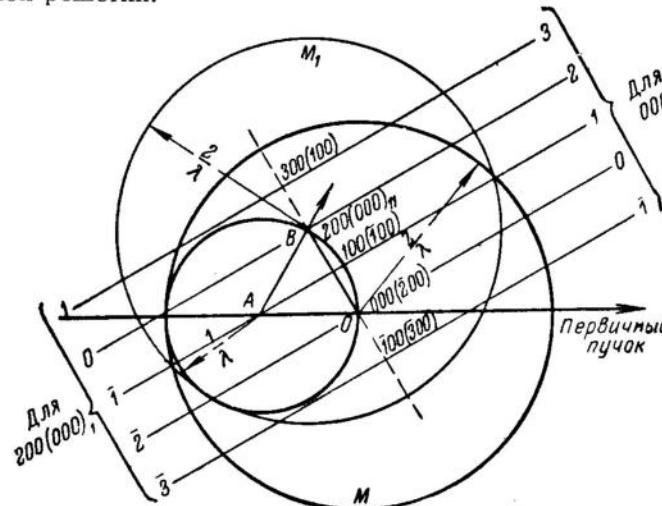


Рис. 3. Основная (M) и вспомогательная (M_1) сферы ограничения.

Плоскости $1, 0, 1, 2, 3$ основной решетки совмещаются с плоскостями $3, 2, 1, 0, 1$ вспомогательной решетки

Если какой-нибудь узел вспомогательной решетки коснется сферы интерференции, то возникнет вторичный максимум. Таким образом, сфера интерференции остается на месте, сдвинутая же сфера ограничения влечет за собой вспомогательную обратную решетку, которая существует в течение существования дифракционного максимума.

Если узел hkl расположен на сфере интерференции в течение всего времени съемки ($\mu = -v$), то на снимке должны появиться рентгенограммы от обоих пучков — hkl и 000 .

Если при некотором положении кристалла возникает несколько дифракционных максимумов, например $h_1k_1l_1$ и $h_2k_2l_2$, то появляются и производные (вторичные) максимумы

$$\begin{aligned} 000 &\rightarrow h_1\bar{k}_1\bar{l}_1, \bar{h}_2\bar{k}_2\bar{l}_2; \\ h_1k_1l_1 &\rightarrow (000)_1 \rightarrow (h_1 - h_2, k_1 - k_2, l_1 - l_2); \\ h_2k_2l_2 &\rightarrow (000)_2 \rightarrow (h_2 - h_1, k_2 - k_1, l_2 - l_1). \end{aligned}$$

Максимумы $h_1k_1l_1$ и $h_2k_2l_2$ ослабляют первичный пучок 000 , максимумы же второго типа, распространяясь по направлению $h_1k_1l_1$ и $h_2k_2l_2$ (вторичных первичных пучков), нивелируют величину их относительной интенсивности.

Следовательно, если на сфере интерференции одновременно располагаются m узлов плюс нулевой узел обратной решетки, то возникает $m(m+1)$ вторичных максимумов.

Итак, если N — число дифракционных максимумов, возникающих при данном способе исследования, то и число вспомогательных обратных решеток также равно N . Возникают ли при этом «лишние» максимумы? Так как вспомогательные решетки получаются из основной путем параллельного переноса, то отдельные плоскости обеих решеток совмещаются друг с другом. Если это совмещение не различимо, то новых дифракционных направлений не возникает. Если же совмещенные плоскости не подобны, то образуются промежуточные узлы, которые, коснувшись сферы интерференции, обеспечивают появление «лишних» рефлексов, запрещенных структурным множителем.

При взаимодействии дифракционных максимумов с кристаллом (элементарная ячейка с базисом) число максимумов, распространяющихся по разным направлениям, не может превысить числа максимумов для кристалла с примитивной элементарной ячейкой с теми же осевыми трансляциями при одинаковых условиях съемки.

Обобщенный образ обратной решетки представлен на рис. 4. Поясним сказанное примерами.

Графит. Нулевая и первая плоскости обратной решетки гексагонального графита изображены на рис. 5. Максимумы с $h+2k=3n$ при $l=2n+1$ запрещены структурным множителем.

Однако из-за вторичных максимумов узлы типа $001, 111, 301\dots$ должны учитываться. Если, например, узел 001 касается сферы интерференции одновременно с каким-нибудь из узлов первой плоскости обратной решетки $hk1$, то по направлению 001 распространяется вторичный максимум с индексами $h \bar{k} 0$. В этом случае осуществляется наложение нулевой плоскости на первую плоскость, причем узел 000 нулевой плоскости совмещается с узлом $hk1$ первой плоскости. Большая часть узлов нулевой плоскости (узлы с $|F|^2=1$) и ряд узлов hkl при соответствующих совпадениях также могут создать вторичные максимумы, не различимые по направлению с максимумом 001 .

Следовательно, любой из узлов ($|F|^2=0$) с индексами $h+2k=3n$ при $l=2n+1$ может создать рефлекс на рентгенограмме. Конечно, эта возможность осуществляется достаточно редко, однако нельзя пренебрегать ею.

Алмаз. Нулевая, первая и вторая плоскости обратной решетки алмаза изображены на рис. 6. Так же, как и для графита, вторичные максимумы, распространяясь по направлению запрещенных

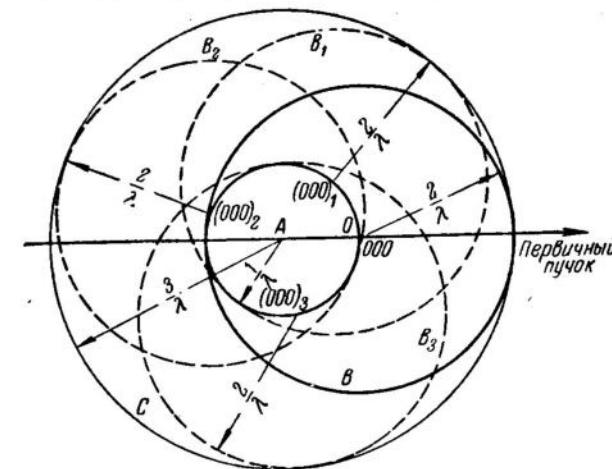


Рис. 4. Обобщенный образ обратной решетки:
A — сфера интерференции; B — сфера ограничения для основной обратной решетки; B_1, B_2, B_3 — возможные положения сдвинутых сфер ограничения для вспомогательных обратных решеток; C — сфера радиуса $\frac{3}{\lambda}$ — максимальная область существования узлов вспомогательных обратных решеток

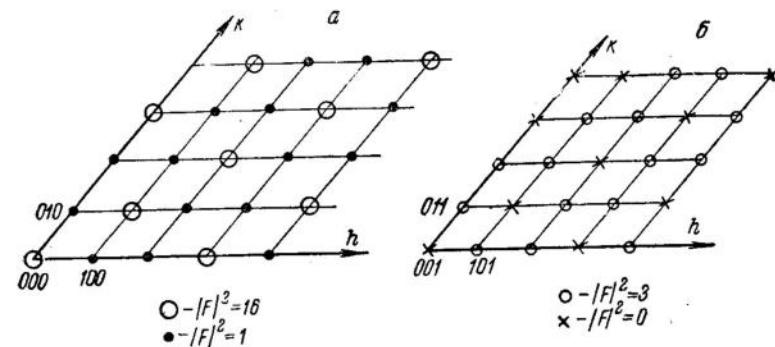


Рис. 5. Нулевая (a) и первая (б) плоскости обратной решетки графита

максимумов, изменяют узор обратной решетки. Обратная решетка становится геометрически тождественной обратной решетке гранецентрированной структуры. Поэтому запрещенные максимумы в алмазе ($c/F^2=0$ при $l=2n$) могут наблюдаться. Например,

запрещенный максимум с индексами 222 регистрировался рядом исследователей [2]. Очевидно, подобные максимумы возникают не только в графите и алмазе. Поэтому при обнаружении запрещенных максимумов их нельзя считать «случайными», а надо проверять, по наложению соответствующих плоскостей обратной решетки, не является ли данный максимум вторичным. Интенсивность запрещенных максимумов обычно невелика из-за малости времени пребывания узлов обратной решетки на сфере интерференции.

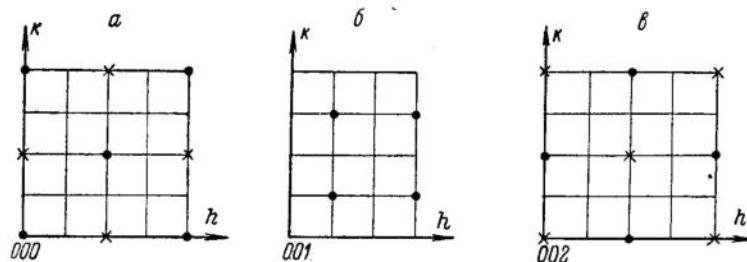


Рис. 6. Плоскости обратной решетки алмаза:

a — нулевая; *б* — первая; *в* — вторая.
Крестиками отмечены узлы, вес которых ($|F|^2$) равен нулю

Однако если запрещенный максимум располагается на сфере во все время съемки ($\mu = -v$), то его интенсивность может быть достаточно велика.

В этом случае можно сделать неверное заключение о пространственной группе кристалла (определить, например, пространственную группу D_2^3 вместо D_2^4).

2. МАКСИМАЛЬНАЯ И МИНИМАЛЬНАЯ СФЕРЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ ОБРАТНОЙ РЕШЕТКИ

Максимальная сфера существования

При выборе длины волны рентгеновских лучей исследователь руководствуется рядом соображений [4]. Иногда бывает необходимо подобрать такое излучение, при котором получается наибольшее количество рефлексов на рентгенограмме.

Подсчитать число рефлексов можно следующим образом.

Если n_0 — число узлов в элементарной ячейке обратной решетки, то число узлов обратной решетки, находящихся внутри сферы ограничения, примерно пропорционально

$$n = \frac{n_0 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{2}{\lambda}\right)^3}{V_0^*}, \quad (2)$$

где V_0^* — объем элементарной ячейки обратной решетки;
 λ — длина волны рентгеновских лучей.

При применении излучения $Mo K_\alpha$ вместо $Cu K_\alpha$ число рефлексов увеличивается примерно в 8 раз. Чем меньшую длину волны мы выберем, тем большее число рефлексов получим на рентгенограмме.

Однако не имеет смысла использовать рентгеновские лучи с длиной волны меньшей, чем характеристическое излучение K -серии молибденового анода, из-за влияния атомно-теплового множителя. Подтвердим это расчетом.

Считая атомный множитель для всех рефлексов одинаковым, получим заведомо неточный результат. Однако порядок величины предельной длины волны не должен существенно измениться. Зависимость интенсивности дифракционных максимумов от температуры может быть представлена в виде [4]

$$I_t = I_0 e^{-2M}, \quad (3)$$

где I_0 — интенсивность дифракционного максимума при абсолютном нуле температуры;

I_t — интенсивность при температуре T ;

$$M = 8\pi^2 \bar{U}^2 \left(\frac{\sin \Theta}{\lambda} \right)^2;$$

\bar{U}^2 — среднее квадратичное смещение атомов относительно положения равновесия;

Θ — угол Вульфа-Брэгга;

λ — длина волны рентгеновских лучей.

Положим, что при данной температуре T на рентгенограмме можно различить рефлексы, отличающиеся друг от друга в 300 раз по интенсивности:

$$\left(\frac{I_2}{I_1} \right)_t = \frac{1}{300}.$$

Используя соотношение (3),

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{I_2}{I_1} \right)_t &= e^{-(2M_2 - 2M_1)} = \frac{1}{300} \approx e^{-6}; \\ M_2 - M_1 &= 3; \\ 8\pi^2 \bar{U}^2 \left[\left(\frac{\sin \Theta_2}{\lambda} \right)^2 - \left(\frac{\sin \Theta_1}{\lambda} \right)^2 \right] &= 3. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Положим, что исследуется кристалл $NaCl$ при $T = 290^\circ K$. Примерное значение \bar{U}^2 для ионов Na и Cl при этой температуре равно $0,23 \text{ к}X$ [5].

Определим радиус максимальной сферы существования обратной решетки $NaCl$.

Из уравнения (4) имеем

$$\frac{\sin \Theta}{\lambda} = \frac{n}{2d} \approx 1 kX^{-1}. \quad (5)$$

Откуда

$$|\vec{H}|_{\max} = \frac{n}{d} \approx 2 kX^{-1}.$$

Пренебрегая атомным множителем, мы получили несколько завышенный результат ($\lambda = 1 \text{ к}X$ вместо $\lambda = 0,7 \text{ к}X$), но порядок величины подсчитан правильно.

Таким образом, для любого кристалла при данной температуре может быть вычислен радиус максимальной сферы существования узлов обратной решетки. Если же радиус сферы ограничения будет больше радиуса сферы существования, то, очевидно, при

$$\frac{\sin \Theta}{\lambda} = \text{const},$$

чем меньше длина волны применяется, тем меньше интервал углов θ можно зарегистрировать на рентгенограмме.

Например, при дифракции электронов [6] наибольшие углы θ , регистрируемые при $\lambda = 0,05 \text{ к}X$, порядка нескольких градусов. Из выражения (5) имеем

$$Sm \Theta_{\max} = 0,05;$$

$$\Theta_{\max} = 3^\circ.$$

Следовательно, применяя коротковолновое излучение (дифракция протонов, нейтронов, электронов, гамма-лучей и т. д.), можно для объяснения малости наблюдаемого интервала угла дифракции учитывать только влияние теплового множителя.

Подставляя данное значение λ в выражение (3) и проводя аналогичный расчет из уравнения (5), получим во всех случаях правильный порядок величины интервала экспериментально наблюдавшихся углов дифракции.

Радиус сферы существования может быть и больше и меньше радиусов сферы ограничения. Очевидно, лучше выбирать излучение с такой длиной волны, при которой радиус сферы ограничения несколько больше радиуса сферы существования. В этом случае углы дифракции меньше 180° и можно получить полную дифракционную картину без особых затруднений. Если же радиусы сфер одинаковы, то в общем случае будут существовать узлы обратной решетки, расположенные на сфере ограничения.

Максимумы, распространяющиеся в направлении, обратном направлению первичного пучка рентгеновских лучей, принципиально зафиксировать возможно, если измерять интенсивность первичного луча после его прохождения через кристалл. Каждый

дифракционный максимум будет дополнительно ослаблять первичный пучок. Это ослабление можно регистрировать ионизационным методом при любом угле дифракции, в том числе и при $2\theta = 180^\circ$.

Минимальная сфера существования

Если в пространстве обратной решетки провести сферу, радиус которой меньше, чем $\frac{n}{d}$ для любого узла обратной решетки, то такая сфера (с центром в нуле обратной решетки) будет расположена в неэффективной области. Однако эта область неэффективна только для главных дифракционных максимумов.

Не следует забывать, что между каждыми двумя главными максимумами (в том числе и между нулем и первыми узлами) располагается $N - 2$ побочных максимумов, где N — число частиц, по соответствующему направлению, в кристалле [2]. Интенсивность побочных максимумов обычно невелика, но если размеры кристалла по какому-нибудь направлению малы (10—15 элементарных ячеек), то соответствующие побочные максимумы могут быть зарегистрированы на рентгенограмме. Кроме того, в неэффективной области располагаются «узлы», отвечающие неоднородностям и дефектам атомной структуры («рассеяние под малыми углами»). При благоприятных условиях подобные «узлы» могут появиться и вне минимальной сферы существования (при порядке «отражения», большем единицы).

В заключение отметим, что при расшифровке дифракционных картин следует иметь в виду высказанные выше соображения, так как в этом случае исследователь более полно и с большей достоверностью сможет получить необходимые сведения о структуре кристалла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Китайгородский А. И. Рентгеноструктурный анализ. Гостехтеоретиздат, 1950.
2. Джеймс Р. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей. ИЛ, 1950.
3. Комpton А. и Алисон С. Рентгеновские лучи (теория и эксперимент). Гостехтеоретиздат, 1941.
4. Жданов Г. С. и Уманский Я. С. Рентгенография металлов. Ч. 1. ОНТИ, 1937.
5. Лондейл К. Кристаллы и рентгеновские лучи. ИЛ, 1952.
6. Пинскер З. Г. Дифракция электронов. Изд. АН СССР, 1949.

В. А. МОКИЕВСКИЙ, И. И. ШАФРАНОВСКИЙ,
С. И. ГАВРИШУК, А. А. ГУМИЛЕВСКИЙ

ГОНИОМЕТРИЧЕСКОЕ И СТРУКТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОСТЕЙ РАСКОЛА НА БУЛЯХ ИСКУССТВЕННОГО РУБИНА

Опубликованное в трудах Института кристаллографии АН СССР исследование плоскостей раскола булей искусственного корунда производилось З. М. Пиголиной и В. В. Святухиным с помощью оптического и рентгенометрического методов [7]. В статье неоднократно подчеркивается, что однозначные определения кристаллографических символов плоскостей раскола можно сделать только методом рентгеновского анализа.

Цель настоящей статьи, во-первых, показать, что подобное определение осуществляется элементарно просто и притом весьма точно гониометрическим методом, во-вторых, здесь отмечается, что, вопреки широко распространенным взглядам, в кристаллах корунда вполне возможна слайность, с которой главным образом и связаны расколы.

В статье Н. Н. Марочкина и И. И. Шафрановского было показано, что поверхность корундовой були при определенных условиях освещения начинает ярко сверкать [6]. Эта поверхность покрыта множеством мельчайших кристаллографических гранок, которые на гониометре дают отчетливые световые сигналы, позволяющие производить отсчеты сферических координат.

Особенно четок легко распознаваемый одиночный сигнал, получающийся от пинакоида, что позволяет без труда определить на гониометре угол между оптической осью и осью роста були. Ось роста були при этом совмещается с горизонтальной осью прибора. Нанесение гномостереографических проекций замеренных граней на сетку Вульфа позволяет графически выявить расположение элементов симметрии були и определить кристаллографический характер найденных форм¹.

¹ А. А. Гумилевским был сконструирован специальный прибор — упрощенная модель федоровского гониометра — для определения кристаллографической ориентировки буль в условиях производства [3]. С помощью этого прибора так же, как и на обычном гониометре, легко найти не только тройную ось корунда, но и его двойные оси, выходы которых обычно совпадают с серединой световых полос, соединяющих световые сигналы от ряда дипирамид.

Гониометрическим методом легко определить и кристаллографический характер поверхности раскола путем улавливания отблесков от этой поверхности и сопоставления их со световыми сигналами от граней, покрывающих поверхность були. Поверхности раскола, как показали исследования З. М. Пиголиной и В. В. Святухина, в некоторых случаях приближаются к плоскостям, но в основном являются сложными.

Ровная зеркальная плоскость раскола дает на гониометре ясно выраженный отдельный световой сигнал. При наличии же изломов на гониометре наблюдается множество световых сигналов, обычно сгруппированных в обширные световые полосы и поля. В этом случае рекомендуется покрыть исследуемые участки поверхности раскола мелкими кусочками покровных стекол. Улавливая световые сигналы от таких стекол и беря средние значения измеренных сферических координат, получим данные для определения кристаллографических поверхностей раскола.

В случае раскола со сложными поверхностями с помощью гониометрического метода может быть найдено множество кристаллографических форм, входящих в состав раскола.

В качестве примеров приведем результаты измерений нескольких полубуль корунда.

В табл. 1—3 приведены измеренные сферические координаты φ , ψ для наблюдавшихся световых сигналов, кристаллографические символы и буквенные обозначения соответствующих форм. Номера простых форм для раскола указаны римскими цифрами, простые формы поверхности були — арабскими. Рис. 1—3 изображают гномостереографические проекции найденных гранок.

Всего было исследовано 11 кристаллов. Подробно разберем в качестве примеров три образца (2, 3 и 4): 1) полубуль с волнистой плоскостью раскола (рис. 1); 2) полубуль с зеркально гладкой плоскостью раскола (рис. 2) и 3) полубуль с резко выраженной ребристой поверхностью раскола (рис. 3).

Расколы исследованных 11 образцов совпадают со следующими формами:

Символ грани	Частота повторяемости
1120	6
1011	3
1010	3
3032	1

На разломах двух образцов присутствовали одновременно две формы {1011} — {1010} и {1011} — {3032}.

При исследовании поверхностей полубуль был обнаружен ряд форм, до сих пор не отмечавшихся для булей искусственного рубина. В связи с этим целесообразно привести полный список

Пример 1 (образец 2)

Номер про- стой формы	φ°	ρ°	Символ грани	Буквенное обозначе- ние формы	Исследуемая поверхность
I	26	$88\frac{1}{2}$	1120	a	Раскол
1	$62\frac{1}{2}$	23	1120	a	Поверхность були
2	$215\frac{1}{2}$	38	2243	n	» »
3	$172\frac{1}{2}$	$45\frac{1}{2}$	1120	a	» »
4	146	$64\frac{1}{2}$	2243	n	» »
5	287	68	0001	o	» »

Пример 2 (образец 3)

Номер про- стой формы	φ°	ρ°	Символ грани	Буквенное обозначение формы	Исследуемая поверхность
I	30	90	1120	a	Раскол
1	$232\frac{1}{2}$	23	2243	—	Поверхность були
2	118	46	0001	o	» »
3	279	49	1120	a	» »
4	$339\frac{1}{2}$	$59\frac{1}{2}$	1120	a	» »
5	186	68	2243	n	» »
6	207	$88\frac{1}{2}$	1120	a	» »

Пример 3 (образец 4)

Номер про- стой формы	φ°	ρ°	Символ грани	Буквенное обозначение формы	Исследуемая поверхность
I	134	91	1011	r	Раскол
II	74,	91	3032	t	»
1	$314\frac{1}{2}$	$89\frac{1}{2}$	1011	r	Поверхность були
2	211	51	3032	t	» »
3	8	64	0001	o	» »
4	272	79	1010	b	» »
5	134	91	1011	r	» »

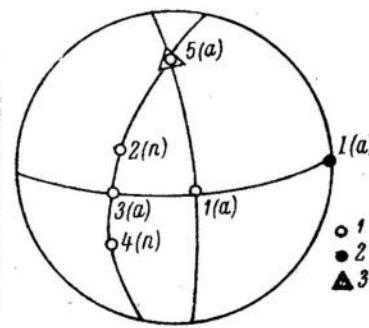


Рис. 1. Полубуля с волнистой плоскостью раскола:
а — обычный случай;
б — гномостереографическая проекция; 1 — формы поверхности були; 2 — плоскости раскола; 3 — выход тройной оси симметрии, совпадающей с проекцией пинаконда (0001)

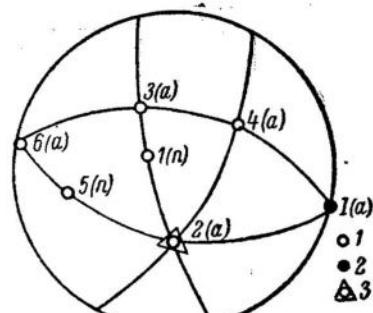


Рис. 2. Полубуля с зеркально гладкой поверхностью раскола (а, образец является редким исключением). Гномостереографическая проекция полубули (б):
1 — формы поверхности були; 2 — плоскости раскола; 3 — выход тройной оси симметрии, совпадающей с проекцией пинаконда (0001)

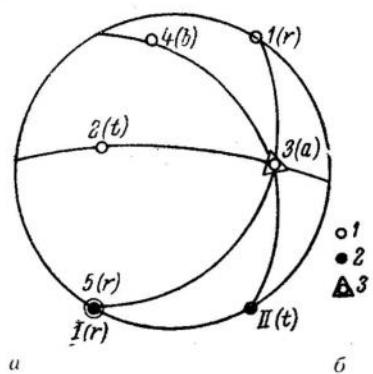


Рис. 3. Полубуля с резко выраженной ребристой поверхностью раскола (а). Ребристость вызвана наличием двух кристаллографических форм {1011} и {3032}. Гномостереографическая поверхность полубули (б):
1 — формы поверхности були; 2 — плоскости раскола; 3 — выход тройной оси симметрии, совпадающей с проекцией пинаконда (0001)

форм, обнаруженных на булях с соответствующими буквенными обозначениями и сферическими координатами (табл. 4).

Изученные були были также просмотрены на оптическом приборе С. В. Грум-Гржимайло.

Сопоставление измерений углов между осью удлинения були ОУ и тройной осью симметрии g_3 , полученных гониометрическим и оптическим путем, показало вполне удовлетворительные результаты (табл. 5).

Таблица 4

Буквальное обозначение	Символ грани	φ	θ	Номер образца	< ОУ : g_3	
					гониометрический метод	оптический метод
а	0001	∞	0°	1	58°	57°
д	1012	0°	$38^\circ 14'$	2	68°	67°
т	1011	0°	$57^\circ 37'$	3	46°	46°
т	3032	0°	$67^\circ 04'$	4	64°	62°
q	7071	0°	$84^\circ 49'$	5	$64\frac{1}{2}^\circ$	65°
s	1123	30°	$42^\circ 20'$	6	$58\frac{1}{2}^\circ$	60°
n	2243	30°	$61^\circ 12'$	7	55°	55°
в	4483	30°	$74^\circ 38'$	8	55°	57°
m	4481	30°	$84^\circ 46'$			
в	14.14.28.3	30°	$86^\circ 02'$			
б	1010	0°	90°			
а	1120	30°	90°			

Таблица 5

Буквальное обозначение	Символ грани	φ	θ	Номер образца	< ОУ : g_3	
					гониометрический метод	оптический метод
а	0001	∞	0°	1	58°	57°
д	1012	0°	$38^\circ 14'$	2	68°	67°
т	1011	0°	$57^\circ 37'$	3	46°	46°
т	3032	0°	$67^\circ 04'$	4	64°	62°
q	7071	0°	$84^\circ 49'$	5	$64\frac{1}{2}^\circ$	65°
s	1123	30°	$42^\circ 20'$	6	$58\frac{1}{2}^\circ$	60°
n	2243	30°	$61^\circ 12'$	7	55°	55°
в	4483	30°	$74^\circ 38'$	8	55°	57°
m	4481	30°	$84^\circ 46'$			
в	14.14.28.3	30°	$86^\circ 02'$			
б	1010	0°	90°			
а	1120	30°	90°			

Таким образом, гониометрический метод исследования булей искусственного корунда дает точное представление о кристаллографической природе поверхностей раскола искусственных рубинов. Простота и наглядность метода позволяют рекомендовать его как для быстрого нахождения кристаллографической ориентировки булей корунда, так и для детального исследования их кристаллографических форм.

Переходим к вопросу о спайности корунда.

Как известно, расколы искусственного рубина и природного корунда по плоскостям {1120}, {1010} и {1011} объясняются в литературе явлениями отдельности, связанными с механическим двойникованием и скольжением [2, 4, 5]¹. Однако имеются

¹ Вопрос об отдельности по (0001) здесь не рассматривается.

достоверные указания [5], что в полубулях и заготовках из искусственного рубина механических двойников не наблюдается. Напрашивается естественный вывод о том, что расколы искусственного рубина связаны не с явлениями механического двойникования, а со спайностью, зависящей от кристаллической структуры.

Для выяснения возможности наличия спайности по указанным выше плоскостям была рассмотрена атомная структура корунда.

Структура корунда представляет собой почти неискаженную плотную гексагональную упаковку из анионов кислорода, две трети октаэдрических пустот которой заполнены катионами алюминия. Характерным для структурного типа корунда является то, что алюминиевые слои, параллельные пинакоиду, повторяются не через один, а через два слоя. Мотивы плоских сеток пинакоида изображены Н. В. Беловым [1].

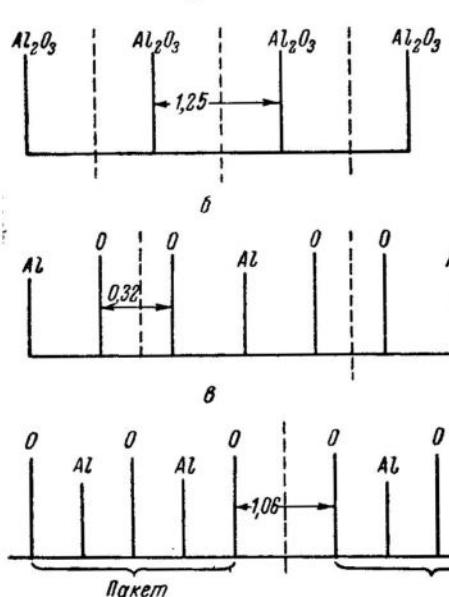
Различные проекции структуры корунда отчетливо свидетельствуют о наличии возможной спайности, проходящей параллельно граням

Рис. 4. Серии плоских сеток корунда:
а — призмы {1010}; б — призмы {1120};
в — ромбоэдры {1011}

{1120}, {1010} и {1011}. Чередование плоских сеток, параллельных указанным граням, полностью согласуется с правилами спайности для ионных кристаллов, сформулированными Н. В. Беловым и М. В. Классен-Неклюдовой [2].

Расколы по плоскостям {1010} связаны с тем, что плоские сетки, параллельные граням этой призмы, содержат в своем составе кислород и алюминий в соотношении Al_2O_3 (рис. 4, а) и в этом смысле аналогичны плоскостям {100} каменной соли. Расстояние между сетками равно 1,25 Å. Электростатическая нейтральность сеток {1010} обеспечивает возможность раскола параллельно граням этой призмы.

Грани призмы {1120} построены иначе. Здесь имеется следующее чередование плоских сеток (рис. 4, б): $\text{Al} - \text{O} - \text{O} - \text{Al} -$



$\text{O} - \text{O} - \text{Al}$. Расстояния между соседними сетками равно 0,72 Å. Таким образом, раскол, параллельный граням призмы {1120}, должен проходить между двумя кислородными сетками, где действуют преимущественно силы отталкивания.

Чередование плоских сеток, параллельных граням ромбоэдра {1011}, сходно с предыдущим случаем, но отличается тем, что алюминиевые слои повторяются не через два кислородных слоя, а расположены подряд между двумя кислородными слоями, образуя как бы пакет (см. рис. 4, в). Вся структура в направлении перпендикуляра к граням ромбоэдра {1011} состоит из пакетов $\text{O} - \text{Al} - \text{O} - \text{Al} - \text{O}$. Такие пакеты соприкасаются друг с другом кислородными сетками, между которыми и происходит раскол по спайности. Расстояние между пакетами равно 1,06 Å.

Следовательно, у корунда имеется спайность, параллельная граням гексагональных призм {1010}, {1120} и ромбоэдра {1011} — всего девять плоскостей спайности. Несмотря на несовершенный характер спайности корунда, зеркально гладкие плоскости раскола можно получить направлением скальвающей силы вдоль плоскостей спайности. Это весьма существенно при первом этапе обработки булей — при расколе ее пополам. В дальнейшей обработке заготовок во избежание брака следует учитывать наличие спайности по всем девяти плоскостям. Степень совершенства той или иной спайности можно определить только статистическим методом. Рассмотрение структуры показывает только, что из трех указанных спайностей лучшей будет спайность по призме {1120} и ромбоэдру {1011}.

ЛИТЕРАТУРА

- Белов Н. В. Структура ионных кристаллов и металлических фаз. Изд. АН СССР, 1947.
- Белов Н. В. и Классен-Неклюдова М. В. О характере разрушения кристаллов. ЖТФ, 1948, т. XVIII, вып. 8.
- Гумилевский А. А. Гониометр для точного определения кристаллографической ориентировки булей искусственного рубина. Сб. «Кристаллография», вып. 4, изд. ЛГИ, 1955.
- Классен-Неклюдова М. В. Механические свойства кристаллов корунда. ЖТФ, 1942, т. XII, вып. 9.

5. Классен-Неклюдова М. В., Икорникова Н. Ю., Томиловский Г. Е. Пластическая деформация кристаллов синтетического корунда. Труды Института кристаллографии АН СССР, 1953, вып. 8.
6. Марочкин Н. Н. и Шафрановский И. И. Кристаллография булей искусственного рубина. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1953, ч. 82, вып. 1.
7. Пиголина З. М. и Святухин В. В. Исследование плоскостей раскола синтетического корунда оптическим и рентгенографическим методами. Труды Института кристаллографии АН СССР, 1953, вып. 8.

М. Н. БАЛАШОВА, И. И. ШАФРАНОВСКИЙ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛОВ ПО ВИДАМ СИММЕТРИИ

В минерало-кристаллографической литературе неоднократно приводились сводки распределения кристаллов по сингониям. Указания на них можно найти в статье А. М. Болдыревой, содержащей соответственные подсчеты, полученные на основе материалов «Царства кристаллов» Е. С. Федорова и его сотрудников [9]. Недавно появилась новая сводка В. Новацкого, показывающая распределение кристаллов по пространственным группам [5]. В отличие от предыдущих в настоящей статье приводятся только те минералы, которые отнесены к тому или иному виду симметрии.

При получении приводимых ниже данных использованы известные сводки Г. Штрунца, Дж. Дэна, О. М. Шубниковой, И. и Г. Доннэй и В. Новацкого [3, 8, 10, 11]. Табл. I содержит результаты проведенных подсчетов. Цифры в клетках, отвечающих видам симметрии, показывают число минералов, приходящееся на тот или иной вид. Как видно из таблицы, наибольшее число минералов отнесено к планаксиальным видам симметрии, несколько меньшее — к центральным. Для подавляющего большинства минералов констатируется наличие центра инверсии. Беднее минералами столбцы с примитивными и гириодпримитивными видами симметрии. На первом месте по количеству минералов стоит планаксиальный вид моноклинной сингонии (283 минерала), на втором — планаксиальный вид ромбической сингонии (214 минералов).

В целях сопоставления важнейших по количеству минералов видов симметрии с видами, допускающими наличие плотнейших шаровых и эллипсоидальных упаковок, в таблице крестиками отмечены виды, допускающие плотнейшие упаковки шаров (по Н. В. Белову [1]) и звездочками — виды с однородно деформированными шаровыми укладками (по В. И. Михееву. [4]).

Говоря о принадлежности того или иного минерала к какому-либо определенному виду симметрии, надо помнить, что многое здесь подлежит дальнейшей проверке и уточнению.

Таблица 1

Сингония	Вид симметрии					
	примитивный	центральный	планочный	аксиальный	плоский-альян	тигрито-примитивный
Триклиническая	$\bar{1}$ *	C_{53} *				
Моноклиническая			P_{15} *	G_2 10 *	CG_2P 278 *	
Ромбическая			G_22P 22 *	$3G_2$ 17	C^3G_23P 217 *	
Тетрагональная	G_3 1	CG_3 29	C_3P 16 +	G_3G_2 7	CG_3G_23P 56 +	
Тетрагонально-цилиндрическая	G_4 3	CG_4P 10	G_44P 1	G_44G_2 4	CG_44G_25P 50 *	G_{i_4} 4
Гексагональная	G_6 5	CG_6P 9	G_66P 8 +	G_6G_2 4	CG_66G_27P 31 +	G_{i_6} 6
Кубическая	$3G_24G_3$ 6	$C^3G_24G_33P$ 20	$3G_24G_36P$ 31	$3G_44G_36G_2$ $-$	$C^3G_44G_36G_29P$ 96 +	

Определение вида симметрии и даже сингонии кристаллов зачастую встречается с целым рядом затруднений. В качестве примера приведем кристаллы алмаза, относительно симметрии которых долгое время велась ожесточенная дискуссия. На алмазах, как известно, наблюдались и октаэдрические и тетраэдрические формы, в связи с чем исследователи относили их то к пла-наксиальному (гексоктаэдрическому), то к планальному (гекса-тетраэдрическому) видам симметрии.

Сторонники октаэдрической симметрии рассматривали тетраэдры как октаэдры с неполным развитием граней, а защитники тетраэдрической симметрии считали октаэдры комбинациями из двух тетраэдров. Согласно данным рентгеноанализа, структура алмаза отвечает пространственной группе O_h^7 , т. е. относится к гексоктаэдрическому виду симметрии. Однако в последнее время индусский физик Раман и другие исследователи показали, что, приписывая атомам углерода в структуре алмаза не шаровую, а тетраэдрическую симметрию, можно при различных ориентировках атомов получить структуры и октаэдрической и тетраэдрической симметрии. Физические испытания подтвердили наличие для алмазов структур и той и другой симметрии.

В настоящее время считают, что кристаллы алмаза обычно представляют сложные двойниковые срастания, в состав которых входят пластинки и тетраэдрической и октаэдрической симметрии [6]. Повидимому, алмаз не является исключением. Для некоторых минералов виды симметрии и пространственные группы не соответствуют друг другу. Так, например, для куприта морфологически была определена пентагон-триоктаэдрическая симметрия (аксиальный вид симметрии кубической сингонии), тогда как рентгеноанализ установил для него пространственную группу гексоктаэдрического вида симметрии (O_h^4).

Вульфенит по своей структуре отвечает шеелиту, относящемуся к тетрагонально-дипирамидальному (центральному) виду симметрии, а его морфология показывает тетрагонально-пирамидальную (примитивную) симметрию.

Остановимся на тех затруднениях, которые возникают при определении сингонии и вида симметрии на основе кристалломорфологии. За частую исследователь может быть введен в заблуждение внешним видом кристаллов. Как известно, формы кристаллических многогранников обычно приближаются к кубическим или к гексагональным кристаллам (закон кристаллографических пределов Федорова). Иногда углы отклонений настолько малы, что кристаллам ошибочно приписывали более высокую симметрию.

При отсутствии граней общего положения часто можно ошибочно повысить симметрию. Представим, например, куб с неравномерно развитыми гранями и комбинацию трех пинакоидов

в форме кирпичика, относящуюся к ромбическому кристаллу. Исходя из угловых величин таких кристаллов, легко причислить последнюю комбинацию к кубической сингонии. Для правильного определения, помимо угловых замеров, нужно принять во внимание физические свойства (например, оптические), а также обратить особое внимание на фигуры травления, вицинальные образования, характер штриховки и т. д.

Бывают и прямо противоположные случаи, когда внешний вид кристаллов заставляет ошибочно понизить симметрию.

Известно, что развитие реальных кристаллов (особенно природных) часто сильно отклоняется от идеально развитых многоуграников.

В «Системе минералогии» Дж. Дэна и др. изображен кристалл золота с гранями тетрагонтриоктаэдра {113} [3]. Неравномерное развитие граней привело к тому, что кристалл получил типично тригональный габитус. Частичное объяснение такого развития граней заключается во влиянии симметрии питающей среды на внешнюю симметрию кристалла [7].

Тщательное измерение углов такого кристалла на гoniометре дает возможность установить его настоящую симметрию. Быть может, однако, здесь имеет место и более сложное явление. Так, например, В. И. Михеев, исследовав рентгенометрически кристаллик золота, имевший вид гексагональной призмы с ромбоэдром, но с углами, отвечающими ромбододекаэдру, сильно вытянутому вдоль G_3 , установил в нем наличие множества беспорядочно ориентированных мельчайших кристаллических зерен. Возможно, что такой сложный агрегат получился в связи с переходом золота из неизвестной нам тригональной модификации в кубическую.

В той же «Системе минералогии» Дж. Дэна и др. изображен кристалл пирита с псевдоромбобэдрическим габитусом, обусловленным неполным развитием граней пентагон-додекаэдра. Понятно, что определение не только сингонии, но и вида симметрии для таких кристаллов на основе их формы представляет весьма трудную задачу.

Долгое время считалось, что наиболее надежным способом определения вида симметрии является учет симметрии для фигур травления на гранях кристалла.

Известно, что для кальцита такие фигуры обычно обладают плоскостью симметрии, тогда как на доломите они асимметричны. Поэтому кальцит был отнесен к виду симметрии CG_3G_23P , а доломит — к CG_3 .

В настоящее время известно, что к симметрии фигур травления надо относиться с большой осторожностью. Было обнаружено что их симметрия связана не только с симметрией кристалла, но и с симметрией раствора, вызывающего травление.

Таблица 2

I. ТРИКЛИННАЯ СИНГОНИЯ

1. Примитивный вид симметрии (—) — 1 минерал.
Парагильгардит.
2. Центральный вид симметрии (C) — 53 минерала.
Аксинит, алуноген, альбит, амарантин, амблигонит, анапаит, андезит, аортит, аортоклаз, арамайит, бабингтонит, беллинджерит, биотит (6-слойный), бирюза, битовнит, вальпургит, воксит, ганнаит, гебронит, гогманит, гордонит, дистен (кианит), инезит, ноганнат, квенштедит, коллинсит, копиапит, купрокопиапит, лабрадорит, лейтонит, лопецит, магнезиокопиапит, мейергофферит, микроклин, монетит, монтбрейт, монтебразит, мусковит (24-слойный), натромонтеобразит, олигоклаз, паравоксит, парагоплит, полигалит, ремерит, родонит, сассолин, симплезит, тарбутит, улексит, файр菲尔дит, халькантит, халькосидерит, шизолит.

II. МОНОКЛИННАЯ СИНГОНИЯ

3. Планальный вид симметрии (P) — 15 минералов.
Артинит, галлуазит, гильгардит, диккит, каолинит, клиноэдрит, лепидолит (6-слойный), ломбардит, метагаллуазит, мусковит (1-слойный), накрыт, сколецит, тилазит, тригонит, энделлит.
4. Аксиальный вид симметрии (G_2) — 10 минералов.
Артинит, афвиллит, баритокальцит, брушит, галотрихит, гидрокалюмит, данант, кванселит, мезолит, фармаколит.
5. Планаксиальный вид симметрии (CG_2P) — 278 минералов.
Авгит, адуляр, азурит, акантит, аламозит, аллактит, амариллит, аннабергит, антигорит, арсенопирит, арсенорослерит, арфведсонит, ателестит, атапуллит, аугелит, аурингит, бадделеит, базальтическая роговая обманка, баркевикит, баумгаузерит, бейлинит, бераунит, бериллонит, бианкит, биберит, билинит, биотит (2-слойный), бисмит, бишофит, бледит (астраханит), бобъеррит, боотит, ботриоген, бразилианит, бракебушит, брандтит, бревстерит, брошантит, буланжерит, бура, буссенготит, бютчилийт, вагнерит, вейншенкит, велерит, венценит, вермикулит, весцеплийт, вивианит, вольфенит, вольфрамит, врбант, гадолинит, галлоторхит, ганофиллит, гармотом, гарниерит, геденбергит, гейландит, гейлюссит, гексагидрит, гелландин, гердерит, гернезит, гессит, гиаллофан, гидрагиллит, гидраксилгердерит, гидроцинкит, гипс, глауберит, глаукодот, глаукофан, голквиштит, гомилит, графтонит, грюнерит, гудмундит, гибнерит, гиоролит, дарапскит, датолит, дафнит, девиллин, десмин, джемсонит, диалаг, диккинсонит, диопсид, дитрихит, дитцеит, долерофанит, дугланит, дурангит, дюфренузит, ежекит, жадеит, индерборит, инонит, иоганнесенит, иорданит, кайнит, калаверит, калиборит, калицинит, каринтон, катоптрит, керзутит, кермезит, кернит, кеттигит, кизерит, кировит, клаудитит, клиногумит, клиноклаз, клиноунгемахит, клиноферросилит, клиноноцит, клиноэнстатит, колеманит, корнелит, кренкит, кридит, криолит, крокидолит, кроконит, кроссит, ксантоконит, ксантофиллит, кукеит, куммингтонит, купрокирзовит, купферит, куспидин, лазутил, лаксманнит, ла-

Продолжение табл. 2

наркит, лангенбахит, лансфордит, лаутарит, ледгиллит, ленегит, леонит, лепидолит (2-слойный), летовицит, ливингстонит, линарит, линдгренит, лироконит, лозейит, ломонит, лорандит, лудламит, малахит, маллардит, манганит, маргарит, меланованадит, меланитерит, метаварисцит, метавоксит, миаргирит, минасрагрит, мирабилит, монацит, монтгомерит, мурит, мусковит (2-слойный), натронортоклаз, натрохальцит, нахколит, нептуниит, нитрокальцит, нитромагнезит, озаннит, октофиллит, ортит, ортоклаз, параволластонит, парагонит, паралаурионит, пахнолит, пеннантит, пеннин, перовскит, петалит, пизанит, пиккерингит, пикромерит, пиро-стильбит, пирофиллит, пирсент, плагионит, полигазит, пробертит, прозопит, прохлорит, псевдомалахит, пьемонтиит, распилит, ратит, реальгар, рибекит, роговая обманка, рихтерит, розелит, росслерит, самартинит, самсонит, санидин, сапфирин, саркинит, сармийентит, свартцит, семсент, β -серы, сильванит, сингенит, сирлезит, скорцалит, сми-тит, сода, спенсерит, сподумен, ссомольникит, стеркорит, стильбит, сfen, тальк, тамаругит, тарамит, тенорит, терлингигаит, тилазит, титан-авгит, томсенолит, торендриkit, тортвеййтит, тремолит, тримерит, триплит, триплоидит, трона, тсумебит, уэвеллит, уэлльсит, фассант, ферберит, фидлерит, филиппсит, флогопит, фосфорослерит, фосфосидерит, фосфосиллит, фрейслебенит, фюлеппит, хлороксифит, хлорофеницит, хондродит, хризотил, христианит, цельзиан, цианохроит, циннвалдит, швартцит, ше-нит, шультенит, эвдилидимит, эвклиаз, эгирин, эденит, эккерманит, эпибу-ланжерит, эпидот, эритрин, ярлит.

III. РОМБИЧЕСКАЯ СИНГОНИЯ

6. Планальный вид симметрии (G_2P) — 22 минерала.

Арсенструвит, банаильсит, берtrandит, веберит, гемиморфит, геокронит, дикразит, креннерит, минилюит, натролит, паркерит, пирсонит, пренит, сенжьеит, стефанит, стибиоколумбит, стибиотанталит, сульфоборит, фаматитлит, черчит, чильдренит, энаргит.

7. Аксиальный вид симметрии ($3G_2$) — 17 минералов.

Аделит, аустинит, виттихенит, гольдшмидтин, голеит, госларит, кони-хальцит, лейкофан, моренозит, оксаммит, оливенит, сарторит, стерретит, фронделит, халькоменит, эвхроит, эпсомит.

8. Планаксиальный вид симметрии (C_3G_2P) — 217 минералов.

Авогадрит, адамин, айкинит, аласскит, альстронит, аммониевая селитра, ангидрит, англезит, андалузит, андорит, анклилит, антионит, антлерит, антофагастит, антофиллит, арагонит, арденнит, арканит, атакамит, баве-нит, банаильзит, барилит, барит, беккерелит, бемит, бертьерит, бронзит, брошантит, брукит, буркеит, буронит, вавеллит, валентинит, валерит, варвикит, варисцит, вейбуллит, висмутин, витерит, виттихенит, вольфсбер-гит, врбаит, гайдингерит, галеновисмутит, гамбергит, гидрит, гелио-филлит, гергардит, гетерозит, гетит, герценбергит, гидромагнезит, гидрофиллит, гидроцианит, гиперстен, глаукодот, глаукохроит, голеит, гор-тонолит, гроутит, гуанаюатит, гумит, гутчинсонит, давсонит, данбурит, деклуазит, делоренцит, дербилит, джорджиадезит, диаспор, диафорит, диморфит, дюфтил, жисмондин, зеаманит, зелигманнит, ильвант, кай-нозит, каледонит, калиевая селитра, канникарит, караколит, карминит, карналлит, кемплит, кентролит, кехлинит, клапротит, кнебелит, кобеллит, когенит, козалит, колумбит, кордиерит, корнерупин, конетит, котоит,

Продолжение табл. 2

котунит, кремерзит, кубанит, лавсонит (П), лангит, лантанит, ларсенит, лауринит, лаутит, леконит, леллингит, лепидокрокит, либетенит, ли-биотит, литиофиллит, мансфилдит, марказит, масканит, массикот, меланотекит, менегинит, меркаллит, метааутунит, метасидеронатрит, моддерит, монтничеллит, монтродит, морденит, моттрамит, наигагит, надорит, натроиллит, нессвегонит, ниобит, норбергит, ньюбергит, ове-рит, оливенит, оливин, парабуллерит, паараммельбергит, пиробелонит, поликраз, полимигматит, приорит, псевдобрукит, пурпурит, пухерит, рам-дорит, рамзант, раммельбергит, ратит, реддингит, ромбоклаз, салезит, самлеит, саффлорит, сенгиерит, α -серы, сиклерит, силлиманит, симанит, скородит, скуплит, ставролит, стокезит, стронцианит, сульфоборит, тан-талит, тарарапакит, тейнейнт, теллурит, танардит, термонатратит, тифроит, тешемахерит, тиллит, тиролит, томсонит, топаз, тридимит, трифилит, тунгстит, ураноспинит, уравноцирцит, фаялит, феррисинклерит, фер-руйт, физелиит, фринкит, флюеллит, форстерит, фосфоферрит, фри-зит, фробергит, халькозин, халькокианит, халькостибит, хиггинсит, хло-ротионит, холденит, хризоберилл, хьюэттит, целестин, церит, церуссит, цинкоизит, цоизит, штернбергит, штрэнгит, штромейерит, эвксениит, эм-плектит, энстатит, эосфорит, эпидидимит, эпиянтинит, эриохальцит, эритросидерит, эшинит.

IV. ТРИГОНАЛЬНАЯ СИНГОНИЯ

9. Примитивный вид симметрии (G_3) — 1 минерал.
Грейтонит.10. Центральный вид симметрии (CG_3) — 29 минералов

Андерсонит, анкерит, виллемит, гейкилит, гематолит, гидроталькит, ги-ролит, диоптаз, доломит, ильменит, молизит, нигерит, норденшильдит, паракокимбит, пироаурит, пирофанит, платинит, сенант, стихтит, теллу-ровисмутит, тинкальконит, трегманнит, троостит, унгемахит, фенакит, ферринатрит, халькофанит, хогбемит, цеофиллит.

11. Планальный вид симметрии (G_33P) — 16 минералов.

Алунит, аммониоярозит, аргеноярозит, биверит, гамлинит, дельтант, кар-фосидерит, миллерит, натроалунит, натроярозит, пиаргирит, прустит, псевдовавеллит, спанголит, турмалин, ярозит.

12. Аксиальный вид симметрии (G_33G_2) — 7 минералов.

Берлинит, киноварь, кварц, пломбоферрит, селен, теллур, хизвелудит.

13. Планаксиальный вид симметрии (CG_33G_23P) — 56 минералов.

Аллемонит, армангит, афтиталит, баарит, бедантит, бета-домейкит, брусиц, верлит, висмут, витлокит, вудхуазит, гематит, глазерит, графит, гояцит, делафоссит, жозеит, кальцит, кобальтит, коркит, корунд, лавреницит, лейфит, магнезит, мелонит, молибдофиллит, мышьяк, нигерит, отавит, пальмиерит, паратакамит, пиросмалит, пирохроит, пломбоярозит, портландит, риннит, родахрозит, сванбергит, селитра натровая, сидера-зот, сидерит, скаккит, смитсонит, сурьма, тахигидрит, тетрадимит, фло-ренсит, халькофиллит, хедлинит, хлороалюминит, хлоромагнезит, хлороманганокалцит, чикловит, шабазит, шайлерит, эвдиаллит.

Продолжение табл. 2

V. ТЕТРАГОНАЛЬНАЯ СИНГОНИЯ

14. Примитивный вид симметрии (G_4) — 3 минерала.
Вардит, мульфенит, сарколит.
15. Центральный вид симметрии (CG_4P) — 10 минералов.
Браггит, лейцит, пиннонт, повеллит, уэделлит, фергусонит, форманит, чиллагит, шеелит, штолльцит.
16. Планальный вид симметрии (g_44P) — 1 минерал.
Диаболеит
17. Аксидальный вид симметрии (G_4G_2) — 4 минерала.
Кристобаллит, маухерит, меллит, ретгерсит.
18. Планаксиальный вид симметрии (CG_4G_25P) — 50 минералов.
Аминовит, анальцим, анатаз, апофиллит, аутунит, ашкрофтит, бандилит, бейерит, бисмоклит, бисмутит, болент, везувиан, гаусманнит, гетеролит, гематофанит, гидрогетеролит, джиллеспит, добреит, имльменорутил, каломель, кассiterит, ксенотит, куменгейт, куперит, литарагит, макеййт, матлокит, метаторбернит, метацейнерит, митчерхилит, моссит, β -олово, параметаконит, пиролюзит, платнит, поллуцит, псевдоболент, ризерит, риккардит, рутил, саллит, селант, тапиолит, типпелит, торбернит, торит, фосгенит, трипикент, хнолит, циркон.
19. Гироидо-примитивный вид симметрии (Gi_4) — 4 минерала.
Канит, меланофан, нагиагит, шрейберзит.
20. Гироидо-планальный вид симметрии (Gi_4G_22P) — 8 минералов.
Браунит, гардистонит, геленит, мелилит, русселит, станин, халькопирит, эдингтонит.

VI. ГЕКСАГОНАЛЬНАЯ СИНГОНИЯ

21. Примитивный вид симметрии (G_6) — 5 минералов.
Канкринит, нефелин, таумосит, цинкенит, финненит.
22. Центральный вид симметрии (CG_6P) — 19 минералов.
Апатит, абукумалит, ванадинит, вилькеит, ганксит, гедифан, гидроксилапатит, еремеевит, карбонат-апатит, миметезит, ноцерим, пиromорфит, свабит, симпсонит, ферморит, франколит, фторапатит, хлорапатит, эллестадит.
23. Планальный вид симметрии (G_66P) — 8 минералов.
Бромеллит, вюрцит, гринокит, иодаргирит, лед, мауссанит, сведенборгит, цинкит.
24. Аксидальный вид симметрии (G_6G_2) — 4 минерала.
Калиофиллит, кальсиликит, β -кварц, эвклирцит.

Продолжение табл. 2

25. Планаксиальный вид симметрии (CG_6G_27P) — 31 минерал.
Арит, берилл, брейтгаутит, буттгенбахит, графит, давин, джайпурит, катаплент, клейнит, клокманнит, ковеллин, кокимбит, коннеллит, лангбанит, магнетоплюмбит, меланит, миларит, молибденит, невьянскит, никелит, пен菲尔дит, пирротин, ссысерскит, тизонит, α -тридимит, тунгстенит, флюоцерит, α -халькоzin, цинк, эскеборнит, этtringит.
26. Гироидо-примитивный вид симметрии (Gi_6) —
27. Гироидо-планальный вид симметрии (Gi_63G_23P) — 4 минерала.
Бастнезит, бенитоит, паризит, синхизит.

VII. КУБИЧЕСКАЯ СИНГОНИЯ

28. Примитивный вид симметрии ($4G_33G_2$) — 6 минералов.
Виллиамит, каллилит, лангбейнит, мanganолангбейнит, нитробарит, ульманнит.
29. Центральный вид симметрии ($C3G_24G_33P$) — 20 минералов.
Аммониевые квасцы, биксбит, бравоит, ваясит, вилламанинит, гауерит, герсдорфит, калиевые квасцы, катерьит, кобальтин, лаурит, натриевые квасцы, патридгейт, пепрозеит, пирит, скуттерудит, сперрилит, хлоантит, чатанит, эльпазолит.
30. Планальный вид симметрии ($3G_24G_36P$) — 31 минерал.
Алмаз (T), аннивит, биннит, борацит, гаюин, гельвин, генттельвин, германит, деналит, домейкит, зуннит, колорадоит, колусит, майерсит, маршит, метацинабарит, нантокит, нозеан, онофрит, родицит, содалит, сфalerит, теннантит, тетраэдрит, тиманин, сульванит, фармакосидерит, фрейбергит, шватцит, ширмерит, эвлит.
31. Аксидальный вид симметрии ($3G_44G_36G_2$) —
32. Планаксиальный вид симметрии ($C3G_44G_36G_29P$) — 96 минералов.
Аваруит, алабандин, алмаз (O), алтait, альмандин, андрадит, аргентит, арсенолит, берцелиит, бинглеййт, борнит, бреггерит, бромаргирит, бунзенит, виллиомит, виоларит, вольтант, галаксит, галенит, галит, ганит, герцинит, гидроморомит, гиератит, гроссуляр, добреелит, зигенит, золото, железо, известь, иридий, иттрофлюорит, карролит, кераргирит, клаусталит, консбергит, копит, криолитионит, криптогалит, куприт, левизит, лейцит, линнеит, магнезиоферрит, магнезиохромит, магнетит, манганбецелиит, манганозит, мауцелиит, медь, меланит, микролит, монимолит, монтепонит, мешелланбергит, α -науманнит, нашатырь, нортупит, ольдгамит, палладий, пентландит, периклаз, пикотит, пироп, пирохлор, пиррит, плавозолит, платина, платиноиридий, плеонаст, полидимит, ральстонит, ромеит, свинец, сенармонтит, серебро, сильвин, спессартин, стибиоконит, сульфогаллит, тантал, титано-магнетит, тихит, торианин, треворит, уваровит, уранинит, флюорит, франклинит, хлораргирит, хромит, шнеебергит, шпинель, эглестонит, якобсит.

На фигурах травления присутствуют только те элементы симметрии, которые являются общими и для кристаллической грани и для растворяющей ее среды.

В частности, Руайне показал, что и на гранях кальцита можно получить при травлении растворителем, вращающим плоскость поляризации (левой малоновой кислотой), асимметричные фигуры травления [9].

Следовательно, определение вида симметрии с помощью одной кристалломорфологии представляет нередко большие трудности. Более или менее правильно решать эту задачу можно лишь тогда, когда на кристалле полностью присутствуют грани общей формы и твердо установлена их принадлежность к одной этой форме.

Как показано выше на примере алмаза, рентгенометрическое определение пространственной группы и, следовательно, вида симметрии также далеко не всегда может приводить к однозначному решению. Это нужно учитывать при использовании данных табл. 2, касающихся распределения минералов по видам симметрии. Многие из них, быть может, следовало бы поставить под знаком большого вопроса.

ЛИТЕРАТУРА

- Белов Н. В. Структура ионных кристаллов и металлических фаз. Изд. АН СССР, 1947.
- Болдырева А. М. Новый подсчет количества изученных кристаллов. Записки Минералогического о-ва 1926, ч. 55, вып. 1.
- Дэн Дж. и др. Система минералогии. ИЛ, 1950, т. 1, 1954, т. 2.
- Михеев В. И. Низкосимметричные плотнейшие укладки структурных единиц. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1950, ч. 79, вып. 3.
- Новакий В. Симметрия и физико-химические свойства кристаллических соединений. См. П. Ниггли. Стереохимия. ИЛ, 1949.
- Шафрановский И. И. Алмазы. Изд. АН СССР, 1953.
- Шафрановский И. И. Внешняя симметрия реальных кристаллов и симметрия питающей среды. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1954, ч. 33, вып. 3.
- Шубникова О. М. Новые минеральные виды и разновидности, открытые в 1945—1949 гг. Труды Института геологических наук АН СССР, 1953, вып. 1.
- Шубников А. В. Как растут кристаллы. Изд. АН СССР, 1935.
- I. D. Donnay, W. Nowacki, G. Donnay. Crystal Data. The Geological Society of America, 1954.
- Strunz H. Mineralogische Tabellen. Leipzig, 1949.

И. И. ШАФРАНОВСКИЙ

ИСТОРИЯ УЧЕНИЯ О ФОРМАХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МНОГОГРАННИКОВ

Обращаясь к истокам минералогической и кристаллографической литературы, содержащей огромное количество фактического материала по кристаллам минералов, современный читатель обычно испытывает затруднения из-за незнакомства с теоретическими взглядами прежних ученых, а также из-за незнания прежней терминологии. Поэтому мы и сочли целесообразным дать краткий исторический обзор истории учения о кристаллических формах. Этот обзор сопровождается рядом таблиц, содержащих сопоставление устаревших и современных кристаллографических терминов. Особое внимание в нашем очерке уделяется трудам отечественных кристаллографов и минералогов.

У древних авторов кристаллические формы многогранников почти не упоминаются. Даже в таком обширном труде энциклопедического характера, как «Естественная история» Плиния Старшего (23—79 н. э.), описания кристаллов крайне редки и весьма немногословны. Чаще здесь употребляются лишь лаконические и неточные эпитеты: золото и алмаз — «четыреугольные», горный хрусталь — «шестиугольный» и т. п. [1].

Учение о формах кристаллических многогранников развивалось крайне медленно. Вплоть до XVII в. дальше описаний «удивительных угловатых тел» дело не шло. Недоумения, вызываемые природными многогранниками, зачастую устраивались при помощи толкований мистического порядка. Кристаллам приписывались сверхъестественные и чудодейственные свойства. Даже такой ученый, как И. Кеплер, говоря о кристаллических формах, ссылается на некую фантастическую «образующую силу», которая... «находится во внутренностях земли и подобно рождающей жене производит пять правильных геометрических тел в формах драгоценных камней» [2].

Кстати отметим, что из пяти упомянутых правильных тел — тетраэдра, куба, октаэдра, додекаэдра (с гранями в виде правильных пятиугольников) и икосаэдра — два последних не имеют места в кристаллографии. Таким образом, И. Кеплер исхо-

дил из чисто умозрительных представлений, имея весьма смутное понятие о формах реальных кристаллов.

Вплоть до конца XVIII в. ряд исследователей, введенных в заблуждение изменчивостью природных многогранников одного и того же минерала, упорно отрицал всякое практическое значение многогранников в определении минералов. С другой стороны, геометрически правильная форма кристаллов свидетельствовала о зависимости внешнего вида минералов от их строго закономерного внутреннего строения. Появляются первые очень неясно выраженные идеи о связи формы и состава кристаллов и намечаются первые попытки объяснения формы кристаллов за счет укладок мельчайших шарообразных или эллипсоидальных частиц (Кепплер, Гук, Гюйгенс). Наконец, зарождаются основы учения о простых формах и комбинациях. Н. Стенон (Стенсен) в труде «О твердом, естественно содержащемся в твердом» (1669)¹ пишет: «Как зарождается кристалл, нам неясно, но дальнейший рост уже образовавшегося кристалла вполне понятен. Он происходит не изнутри, как у растений, но единственно путем наложения на внешние плоскости кристалла мельчайших частиц, приносящихся извне некоторой жидкостью» [18]. Несовершенство форм реальных кристаллов кварца Стенон объясняет тем, что отложение вещества на гранях происходит не в одно и то же время и не в одинаковых количествах. Поэтому грани кристаллов на самом деле не являются плоскостями, а представляют отдельные участки, лежащие в различных плоскостях. Некоторые участки граней могут быть даже вогнутыми или выпуклыми, а не плоскостными. Иногда грани являются неровными, представляя подобие лестничных ступеней. Помимо кварца, Стенон кратко описал железный блеск («угловатое железо»), алмаз и пирит (марказит).

Основной заслугой Стенона считается открытие закона постоянства углов. Однако этот закон был им показан лишь на частном примере кристаллов горного хрусталя. Кроме того, указание на данную закономерность находится не в основном тексте работы, а скрыто в объяснениях к рисункам, приложенным в конце сочинения.

Схематичность и незавершенность работы Стенона привели к тому, что сделанные им наблюдения и выводы своевременно не обратили на себя внимания и не сыграли решающей роли в развитии науки о кристаллах.

Позднее целый ряд исследователей заново открывает закон постоянства углов на частных примерах отдельных минералов (Гюйгенс — для кальцита, Левенгук — для гипса и т. д.).

¹ Это сочинение представляет собой лишь введение к большому неоконченному труду «О твердом веществе, наблюдавшем в земле».

В середине XVIII в. замечательные мысли о кристаллах были высказаны М. В. Ломоносовым. Сформулированная двести лет назад в его диссертации «О рождении и природе селитры» [3] гипотеза о строении кристаллов настолько значительна, что год написания этой диссертации можно считать датой зарождения русской научной кристаллографии.

Согласно воззрению Ломоносова, строение селитры соответствует совокупности шарообразных частиц («корпускул»), расположенных плотнейшим образом во всех кристаллах этого вещества. Множество подобных шариков образует кристаллические многогранники. Вследствие одинакового расположения корпускул во всех таких кристаллах одинаковыми будут и углы между соответствующими гранями.

Объясняя закон постоянства углов на кристаллах их внутренним строением (постоянство кристаллических углов было доказано русским ученым путем точных измерений за 20 лет до Ромэ-Делиля), Ломоносов намного опередил своих современников и отчасти предвосхитил взгляды нашего времени. Сама гипотеза о шарообразности корпускул как бы предсказывает современные понятия об атомных и ионных сферах и о роли плотнейших шаровых упаковок в кристаллографии. Во всяком случае, взгляд Ломоносова на строение кристаллов является более близким к современным взглядам, чем позднейшая теория Гаюи, согласно которой кристаллические молекулы имеют полиэдрическую форму.

Большое практическое значение для того времени имело следующее положение Ломоносова о постоянстве (вернее, характерности) форм кристаллов рудных минералов: «Руды иные держатся свойственной себе постоянной фигуры, как кубические марказиты, желтый сферический колчедан, угловатый белый колчедан, иглам подобная сурьма и другие многие» [4].

Для того, чтобы понять важность этого положения достаточно противопоставить ему мнение известного в то время французского натуралиста Бюффона (1707—1788), согласно которому: «Кристаллическая форма не имеет постоянного характера. Она более разнообразна и более изменчива, нежели любой признак, позволяющий различать минералы» [18].

Сейчас мы понимаем, что по сути дела правы были оба учени. Однако Ломоносов подошел к данному вопросу, исходя из практики. Он знал, что рудокопы распознают по внешним формам различные минералы. Поэтому, имея дело с кристаллами одного и того же минерала, следует в первую очередь обращать внимание на то, что является для них общим. Это общее заключается в постоянстве углов между соответствующими гранями, а также в частом появлении на разных кристаллах минерала одних и тех же структурно важных граней. Только изучив эти

общие черты для всех кристаллов одного и того же минерала. можно было перейти к выяснению вопроса об их изменчивости в природных условиях.

Практический подход позволил Ломоносову понять всю важность кристаллических форм минералов как характерных диагностических признаков. Вместе с тем, он хорошо знал и об изменчивости минералов. Как уже указывалось выше, Ломоносову принадлежат одни из самых ранних измерений углов на кристаллах. Выдержка из замечательного ломоносовского трактата «О слоях земных» занимает почетное место в истории кристаллографии: «Наконец отличною фигурой известные и больше всех дорогие камни последуют в своем рождении законам геометрическим углами и плоскостями... Многие из них родятся ромбической фигуры, имея два угла по шестьдесят и два по сто двадцать градусов, что я нарочно мерял у некоторого немалого неграненного алмаза и у других прозрачных камней. Иные суть параллелепипеды шестигранные, чем соответствуют много зернам разных солей» [5, стр. 599].

Чтобы оттенить передовое значение взглядов М. В. Ломоносова, напомним о курьезной систематике минералов К. Линнея (1707—1778), основанной на формах кристаллов. Согласно Линнею, форма минералов всегда образуется за счет присутствия в них некоторой соли. Таким образом, соли являются «отцами» кристаллической формы, а основное вещество камня соответствует материнскому началу. В связи с этим Линней подразделил кристаллы минералов на роды по числу солей, порождающих характерные формы. Вначале он насчитывал всего пять таких солей, впоследствии число формообразующих солей увеличилось [20].

В табл. 1 перечислены роды солей, порождаемые ими формы и вещества (главным образом минералы), причислявшиеся Линнеем к видам той или иной соли.

Квасцы, например согласно взглядам Линнея, порождают октаэдрическую форму. Поэтому к названиям всех веществ, кристаллизующихся в виде октаэдров, Линней присоединяет слово *Alumen* (квасцы), поэтому алмаз по Линнею называется *Alumen Adamas*. При этом сходство различных кристаллов определялось лишь на глаз; угловые величины совершенно не принимались во внимание.

К одному и тому же виду буры, образующей моноклинные кристаллы, в таблице отнесены ромбический топаз, тригональный турмалин и кубические гранаты. Кубический флюорит и ромбоэдрическая (тригональная) натровая селитра отнесены к группе поваренной соли и т. д.

Такая своеобразная систематика не могла помочь практически разобраться во множестве кристаллических форм минера-

Таблица 1

Род (соль)	Форма, порождаемая солью	Вид (минерал)
Поваренная соль	Куб	Флюорит, натровая селитра
Калиевая селитра	Шестигранный столбик с шестигранными пирамидами на концах	Кварц, корунд, берилл
Гипс	Ромбическая табличка с притупленными краями	Гипс
Алюмокалиевые квасцы	Октаэдр	Алмаз, шпинель
Медный купорос	Скошенная призма	Железный и цинковый купорос
Сода (?)	Четырехгранный столбик с косыми гранями на концах	Барит, арагонит (?)
Бура	Сплющенный восьмигранный столбик	Топаз, турмалин, гранат

лов. Однако и сам Линней сознавал неудовлетворительность своей систематики. «Литология не составляет моей гордости», — писал он.

Несмотря на это, авторитет и популярность Линнея привели к тому, что его фантастическая система широко распространялась среди ученых XVIII в. и привела к величайшей путанице в минералогической литературе того времени.

Однако в отечественную литературу по минералогии система Линнея не проникла и не отразилась на взглядах наших ученых.

Несмотря на все свои недостатки, эта система все же представляет исторический интерес, как первая попытка классификации минералов по кристаллографическим формам.

Закон постоянства углов на кристаллах снова привлек внимание ученых лишь в конце XVIII в. В 1783 г. его заново выдвигает французский кристаллограф Ромэ-Делиль (1736—1790).

В своем первом крупном труде «Опыт кристаллографии» Ромэ-Делиль выступил как верный последователь Линнея. Он писал: «Кристаллизация так неотъемлема от солей, что последние следуют принять за первичное начало для всех многоуголь-

ных и многогранных форм, наблюдавшихся на других веществах минерального царства. Как ни разнообразны эти формы, в них все же имеется столько аналогичного с формами солей, что нельзя сомневаться относительно влияния последних на частицы камней, пиритов или металлов, принимающих ту или иную фигуру, свойственную этим солям» [21]. В отличие от Линнея Ромэ-Делиль обращает больше внимания на угловые величины кристаллов, ограничиваясь, однако, лишь плоскими углами.

Никаких обобщений, а в том числе и указаний на закон постоянства углов, в его первой книге мы не находим.

Но через 11 лет в основу своего нового труда [22] Ромэ-Делиль уже кладет закон постоянства углов на кристаллах. Он пишет: «Границы кристалла могут изменяться по своей форме и относительным размерам, но их взаимные наклоны постоянны и неизменны для данного рода кристаллов».

В свое время эта книга явилась полной сводкой описаний всех известных тогда кристаллических веществ. Об энергичной работе ученого и быстром росте кристаллографии того времени свидетельствуют следующие цифры. Линнею было известно 40 кристаллических веществ. В первой книге Ромэ-Делиля дается уже 110 описаний [21], а во втором труде [22] эта цифра достигает уже 500¹.

«Кристаллография» Ромэ-Делиля всецело зиждется на величинах двухгранных углов на кристаллах. Измерения углов производились при помощи весьма примитивного прикладного гoniометра Каранжо, точность которого не превышает $1/2^\circ$. Этому незамысловатому прибору Ромэ-Делиль и был обязан экспериментальным доказательством закона постоянства гранных углов на большом числе кристаллических веществ. Разнообразие форм на кристаллах одного и того же вещества Ромэ-Делиль объяснял следующим: «Какой-либо кристалл, — пишет он, — может быть усеченным в своих вершинах, а также вдоль ребер. Получающиеся при этом новые углы или края могут быть также усеченными. Такие кристаллы с усечениями принадлежат к тому же роду и обладают теми же природными свойствами, что и кристаллы без усечений. Усечения как первичные, так и вторичные, следует относить к случайным явлениям. Последнее видно из того, что зачастую наблюдаются кристаллы, часть которых имеет усечения или на вершинах, или даже и на вершинах и на ребрах, тогда как другая часть тех же кристаллов является совершенно правильной и полной без всяких усечений» [22].

В качестве шести первичных главных форм Ромэ-Делиль называет тетраэдр, куб, октаэдр, ромбоидальный параллелепипед (ромбическая призма), ромбоидальный октаэдр (ромбическая

¹ В настоящее время число подобных описанных кристаллических веществ приближается к 15 000.

дипирамида) и додекаэдр с треугольными гранями (гексагональная дипирамида). К тетраэдру и октаэдру, помимо многогранников с гранями в виде правильных треугольников, относятся также многогранники, имеющие грани в форме равнобедренных или неправильных треугольников.

Само собой разумеется, что приведенный перечень форм может рассматриваться сейчас лишь как исторический курьез.

Идея о первичных формах выдвигалась и другими учеными. Так, например, немецкий минералог и геолог-нептунист А. Вернер (1750—1817), подобно Ромэ-Делилю, рассматривал все кристаллические многогранники как результат притупления или заострения ребер и вершин нескольких основных форм. К основным формам он относил икосаэдр, правильный пентагональный додекаэдр, гексаэдр (куб), столбик, пирамиду, табличку и линзу (чечевицу) [23].

Таким образом, даже в конце XVIII в. среди форм, будто бы свойственных кристаллам, продолжают фигурировать правильные додекаэдры и икосаэдры. Невозможность появления на этих кристаллах многогранников, обладающих пятерными осями симметрии, была доказана лишь впоследствии. Пентагон-додекаэдры в кристаллографии, как известно, имеют грани в виде неправильных пятиугольников. Так называемые «минеральные икосаэдры» пирита представляют собой комбинации октаэдра с пентагон-додекаэдром. Уже один перечень первичных форм показывает, что к кристаллическим многогранникам А. Вернер подходил весьма поверхностно, совершенно игнорируя угловые величины. Несмотря на это, классификация форм по А. Вернеру распространилась среди минералогов. В русскую литературу ее ввел В. М. Севергин. Однако он ясно понимал несостоятельность системы Вернера. В введении к «Естественной истории» В. М. Севергин писал: «Многословные определения внешних признаков, введенные недавно г. Вернером и его последователями, кажется мне, не только понятию о ископаемых телах не придают ясности, но более еще запутывают» [6]. В своем же «Минералогическом словаре» он, отказавшись от формалистического подхода А. Вернера, принимает классификацию форм Р. Ж. Гаюи, основанную на атомистических началах и имевшую в то время, несмотря на все свои несовершенства, передовое значение [7]. Любопытно отметить, что и Ромэ-Делиль и Вернер, выдвинувшие столь сходные положения относительно кристаллических форм, ожесточенно ратовали против структурной теории Гаюи (Ромэ-Делиль называл своего молодого и удачливого соперника «кристаллокластом», т. е. «разбивателем кристаллов», намекая на увлечение Гаюи исследованием спайности кристаллов).

Р. Ж. Гаюи (1743—1822) особенно заинтересовался причиной различия кристаллических форм на кристаллах одного и того

же вещества. Ответ на этот вопрос он пытался дать в своей теории, базирующейся на атомистической гипотезе [24]. Теория Гаюи основывается на спайности. Постепенно раскалывая (деля) кристаллы на спайные осколки, в конце концов, получим такие осколки, которые при дальнейшем раскалывании остаются геометрически подобными самим себе. Эти осколки, по мнению Гаюи, дают понятие о первичной форме или «кристаллическом ядре». Из сказанного видно, что грани первичных форм должны располагаться параллельно плоскостям спайности. Исходя из наблюдений, Гаюи установил всего пять (или шесть) типов первичных форм: параллелепипед, октаэдр, тетраэдр, правильная шестигранная (гексагональная) призма, ромбо-додекаэдр (к ним Гаюи иногда относил и гексагональную дипирамиду). Дальнейшее деление первичных форм вдоль плоскостей, параллельных их граням, приводит, согласно Гаюи, к «интегрирующим молекулам», имеющим форму тетраэдов, трехгранных призм и параллелепипедов. В самом деле, легко сообразить, что, раскалывая параллелепипед по плоскостям, параллельным его граням, мы всегда придем к более мелким параллелепипедам. Разделив таким же образом гексагональную призму, получим шесть интегрирующих молекул в форме трехгранных призм. Ромбо-додекаэдр в результате деления распадается на двадцать четыре тетраэдра. Более сложное явление имеем в случае октаэдра.

Рассекая октаэдр плоскостями, проходящими через середины его ребер и параллельными его граням, получаем в результате шесть октаэдов и восемь тетраэдов.

Итак, формы интегрирующих молекул соответствуют трем типам: тетраэдру — «простейшей по числу граней пирамиде», трехгранный призме — «простейшей по числу граней из всех призм» и параллелепипеду — «простейшему из всех многогранников с попарно параллельными гранями».

Эти формы, ограниченные четырьмя (тетраэдр), пятью (трехгранный призма) и шестью (параллелепипед) гранями, являются одновременно и простейшими замкнутыми многогранниками по числу граней.

По теории Гаюи, кристаллические тела слагаются подобно кирпичным кладкам, причем роль кирпичиков играют первичные формы, состоящие, в свою очередь, из интегрирующих молекул. Все кристаллы одного минерального вида характеризуются совершенно одинаковыми интегрирующими молекулами и первичными формами.

Каким образом одинаковые элементарные частицы слагают столь разнообразные по внешнему виду кристаллы одного и того же вещества? Для объяснения этого явления Гаюи создал «теорию убывания». Кристаллы состоят из налегающих друг на друга слоев. В последовательных слоях закономерно уменьша-

ся число молекул, образующих нечто вроде ступенчатых лестниц. Малые размеры их не позволяют уловить отдельных ступенек. Совокупности их кажутся плоскими гранями. Таким образом, множество первичных кубиков может, например, складываться не только в крупные кубы, но и во вторичные формы — октаэдры, ромбо-додекаэдры и пентагон-додекаэдры.

Классификацию кристаллических форм Гаюи В. М. Севергин принял в своем «Подробном словаре минералогическом» [7] и тем ввел ее в русскую минералогическую литературу начала прошлого столетия (см. табл. 2). Как указывалось, Гаюи подразделяет формы на «первичные» (примитивные) и «вторичные». Понятие о первых можно получить с помощью раскалывания кристаллов по плоскостям спайности. Путем наложения убывающих слоев интегрирующих молекул из первичной формы выводятся разные вторичные. К классификации вторичных форм Р. Ж. Гаюи подходит с различных точек зрения и тем дает весьма подробную и вместе с тем чрезвычайно сложную их систематику. Вторичные формы им рассматриваются в отношении: 1) их собственной геометрической формы; 2) изменениями первичных форм; 3) расположения вторичных граней относительно исходных граней или ребер кристалла; 4) зависимости от законов убывания; 5) геометрических особенностей кристалла и 6) особых частных случаев.

В табл. 2 приведена классификация вторичных форм по геометрической форме. Параллельно с терминами Р. Ж. Гаюи, в скобках даны соответственные русские термины В. М. Севергина, бытовавшие в отечественной минералогической литературе начала XIX в. При объяснении терминов Гаюи мы пользуемся современной кристаллографической номенклатурой и символикой¹.

Как следует из табл. 2, геометрическая классификация кристаллографических форм по Гаюи страдает многими недостатками. Прежде всего чисто случайным является набор первичных форм, полученных в результате наблюдений над спайными осколками. Сам Гаюи колебался в их окончательном выборе и называл то пять, то шесть первичных форм. Однако установление первичных форм отвечает первой слабой попытке найти такие многогранники, которые бы нацело выполняли пространство, будучи равными, параллельно ориентированными и смежными по целым граням. Впоследствии эту задачу блестяще разрешил Е. С. Федоров, осуществив вывод своих знаменитых параллелоэдров.

¹ Под современной номенклатурой как здесь, так и выше подразумевается кристаллографическая номенклатура, принятая в 1925 г. по инициативе А. К. Болдырева Федоровским институтом кристаллографии, минералогии, петрографии, и учения о месторождениях полезных ископаемых

**Классификация кристаллических форм
по Р. Ж. Гаюи и В. М. Севергину**

Таблица 2

I. Первичные формы (первообразные виды)

1. Параллелепипед	Куб, ромбоэдр, тетрагональная и ромбическая призмы с пинакондами и все параллелепипедальные комбинации в низших сингониях
2. Октаэдр (восьмигранник)	Собственно октаэдр, тетрагональная и ромбическая дипирамиды и восьмигранные комбинации в низших сингониях
3. Тетраэдр (четырехгранник)	Кубический, тетрагональный, ромбический тетраэдры и четырехгранице комбинации в низших сингониях
4. Гексагональная призма (шестигранная правильная)	
5. Ромбо-додекаэдр (двенадцатигранник ромбонадальный)	
6. Гексагональная дипирамида (двенадцатигранник сугубо пирамидальный)	

II. Вторичные формы (второобразные виды)

1. Кубические

Пример — флюорит. Первичная форма — октаэдр. Границы куба являются вторичными

2. Кубовидные (кубоватые)

Пример — кальцит. Первичная форма — ромбоэдр $\{10\bar{1}\}$. Вторичный ромбоэдр $\{30\bar{3}2\}$ по углам близок к кубу

3. Тетраэдрические (четырехгенные)

Пример — сфalerит. Первичная форма — ромбо-додекаэдр. Границы тетраэдра являются вторичными

4. Октаэдрические (восьмигенные)

Пример — каменная соль. Первичная форма — куб. Границы октаэдра являются вторичными

Продолжение табл. 2

5. Призматические

Пример — кальцит. Первичная форма — ромбоэдр. Призма $\{10\bar{1}0\}$ является вторичной

6. Додекаэдрические (двенадцатигранные)

Все двенадцатигранные вторичные формы, причем Гаюи помещает сюда и комбинации, состоящие из сходных двенадцати граней

Примеры — пирит. Первичная форма — куб. Пентагон — додекаэдр является вторичной формой. Циркон — первичная форма — призма $\{110\}$ с пинакоидом. Двенадцатигранная комбинация $\{111\}$ с $\{100\}$ (гиацинтовый облик) является вторичной

7. Икосаэдрические (двадцатигранные)

Известна комбинация пирита, состоящая из 20 треугольных граней. 12 треугольников являются равнобедренными, а 8 — равносторонними. Первые являются гранями пентагон-додекаэдра, вторые — октаэдра. Гаюи впервые отметил разницу между гранями этих двух форм

8. Трапециoidalные

Вторичные формы в виде тетрагон-триоктаэдров (грани-трапециды).

Пример — гранат. Первичная форма — ромбо-додекаэдр. Границы тетрагон-триоктаэдра $\{112\}$ являются вторичными

9. Триаконтаэдрические (тридцатигранные)

Комбинация пирита, состоящая из 30 граней, имеющих форму четырехгранников (очевидно, комбинация куба и одного из 24-гранников, встречающихся на пирите)

10. Эннеаконтаэдрические (девяностогранные)

Сложная комбинация везувiana, на которой Гаюи насчитал 90 граней

11. Биромбоэдрические (сугубо ромбонадальные)

Комбинация кальцита, состоящая из двух ромбоэдров. В случае трех ромбоэдров получим триромбоэдрические формы и т. п.

12. Биформные, триформные (двуобразные, триобразные)

Комбинации нескольких различных простых форм.

Пример — алюмокалиевые квасцы. Комбинация октаэдра, ромбо-додекаэдра и куба — триформная

13. Кубооктаэдрические, кубододекаэдрические, куботетраэдрические (кубовосьмигранные, кубодвенадцатигранные, кубочетырехгранные)

Комбинация куба с октаэдром, додекаэдром и тетраэдром

14. Трапециевые (трапецовые)

Комбинации, в которых имеется ряд граней в виде трапеций.

Пример — барит. В комбинации $\{110\}$, $\{011\}$ и $\{010\}$ грани ромбических призм $\{110\}$ и $\{011\}$ имеют форму трапеций

15. Дитетраэдрические (сугубо четырехгенные)

Комбинация двух четырехгенных форм.

Пример — эпсомит. Комбинация ромбической призмы с ромбическим тетраэдром

Продолжение табл. 2

16. Дигексаэдрические (сугубо шестигранные)
Комбинация двух шестигранных форм.
При мер — кальцит. Комбинация гексагональной призмы с ромбоэдром (Гаюи сюда отосит также полевой шпат «с шестигранной призмой и трехгранными вершинами»).
Аналогично выделяются диоктаэдрические, дидодекаэдрические (сугубо восьмигранные, сугубо двенадцатигранные) и прочие формы
17. Три-, третра-, пента-гексаэдрические (трижды-, четырежды-, пяты-, шестигранные)
Комбинации, состоящие из повторяющихся шести граней, расположенных друг под другом.
При мер — кварц. Гексагональная призма в комбинации с двумя «гексагональными пирамидами» (ромбоэдрами). Аналогично выделяются тридодекаэдрические, триоктаэдрические и прочие комбинации (и пример, комбинация трех ромбических или тетрагональных дипирамид относится к «триоктаэдрической»)
18. Дважды сдвоенные или бигеминальные (сугубо сросшиеся)
Комбинация четырех простых форм, из которых каждые две, взятые попарно, относятся к одному и тому же виду простых форм.
При мер — кальцит. Комбинация двух ромбоэдров и двух скаленоэдров
19. Амфигексаэдрические (двойкошестигранные)
Комбинации, дающие шестиугольные сечения в двух различных направлениях.
При мер — актинит
20. Гексадецимальные (шесто-десятые)
Комбинации, состоящие из шестигранной призмы и десяти косых граней.
Аналогично получаются октодецимальные и тому подобные формы
21. Многосторонние или периполигонные
Призматические формы с большим числом граней.
При мер — турмалин
22. Многосложные
Весьма сложные на вид кристаллы
23. Антиэннеаэдрические (противоположно девятигранные)
Кристаллы турмалина с девятью пирамидальными гранями на обоих противоположных концах
24. Прознеаэдрические (смежно девятигранные)
Кристаллы турмалина с девятью пирамидальными гранями на одном конце и девятью призматическими гранями
25. Повторные (возвращающиеся)
Кристаллы кассiterита, в которых число граней, одинаково наклоненных к главной оси, повторяются в следующем порядке: 4, 8, 4, 8, 4
26. Экиферентные (равноразнострующие)
Кристаллы амфиболов, в которых число граней вертикальных и косых на обоих концах образуют начало арифметического ряда: 6, 4, 2

Продолжение табл. 2

27. Конвергентные (сближающиеся)
Кристаллы турмалина, в которых число призматических и пирамидальных граней на обоих концах отвечает ряду: 15, 9, 3
28. Нечетные
Кристаллы турмалина, в которых числа призматических и косых пирамидальных граней на обоих концах являются нечетными
29. Избыточно острые
Комбинация двух весьма острых ромбоэдров на кальците
30. Сфериодальные (шаровые)
Округлые кристаллы алмаза с выпуклыми гранями (первичная форма алмаза — октаэдр)
31. Плосковыпуклые
Кристаллы алмаза с плоскими и выпуклыми гранями

Из четырех типов идеальных федоровских параллелоэдров три (куб, гексагональная призма с пинакоидом и ромбо-додекаэдр) совпадают с примитивными формами Гаюи. Четвертый параллелоэдр — кубооктаэдр — до Е. С. Федорова не был известен. Но, в отличие от примитивных форм Гаюи, русский кристаллограф придавал совершенно другое физическое значение своим параллелоэдрам.

Геометрическая классификация вторичных форм по Гаюи весьма сложна. В начале он как будто бы стремился выделить формы, отвечающие современным простым формам (кубы, кубовидные ромбоэдры, тетраэдры, октаэдры). Начиная с пункта 6 табл. 2 он отступает от этого принципа и наряду с простыми формами вводит комбинации, называя их по суммарному числу граней. Таким образом, снова воскресает пресловутый икосаэдр, хотя Гаюи и отмечает на нем наличие двух сортов граней: в виде правильных и равнобедренных треугольников (невозможность в кристаллографии правильных додекаэдров и икосаэдров была доказана Гаюи его структурной теорией).

Далее появляются тридцатигранные и даже девяностогранные (!) комбинации. Так как комбинаций может существовать неограниченное множество, то лишь благодаря счастливой случайности список названий вторичных комбинаций по числу их граней не разбросся у Гаюи до бесконечности. Судя по следующим названиям форм табл. 2, в дальнейших пунктах принцип нахождения названий по числу граней откладывается и возникает полнейший произвол в их установлении. В большинстве случаев они возникают благодаря чисто случайным особенностям, почему-либо бросившимся в глаза исследователю. Таким образом, классификация

Гаюи не могла существенно продвинуть вперед геометрическое учение о формах кристаллов. Вместе с тем нельзя не подчеркнуть, что для своего времени она имела передовое значение, да и сейчас представляет существенный исторический интерес, как первая попытка структурно-геометрической классификации кристаллографических форм.

Теперь известно, что первичные формы и интегрирующие молекулы Гаюи, в том виде, как он их представлял, не соответствуют действительности. Однако, несмотря на это, некоторые выводы его, в частности закон рациональности отношений параметров простых чисел, регулирующий появление реальных кристаллических граней, остались незыблемыми.

Теория строения кристаллов Гаюи подвергалась в начале прошлого столетия ожесточенным нападкам со стороны немецких кристаллографов с Х. Вейсом во главе, отрицавшим атомистическую гипотезу и исходившим исключительно из наблюдений над внешними формами кристаллов. Е. С. Федоров направление кристаллографии Х. Вейса и его последователей характеризует следующим образом: «Вейс отбросил представление о каких-либо примитивных формах, а вместе с тем и о правильности расположения частиц в пространстве, а изложение кристаллографии основывал на понятии о кристаллографических осиях. Он долгое время искал в этих осиях того, что весьма упрощало бы изложение кристаллографии — прямоугольности; упрощение этого представления привело бы, однако, так сказать, и к обнищанию нашей науки, утомительному однообразию, против которого всегда в истории наук энергично протестовала сама природа вещей».

В общем теория Вейса по сравнению с теорией Гаюи была явным шагом назад, так как вместо систематического развития идеи, положенной Гаюи как надежное основание будущего здания, Вейс, уступая духу эмпиризма, в значительной мере стал делать шаги ощупью, пытаясь без всякой руководящей идеи установить законности, противоречащие природе вещей, например, пытаясь найти для каждого кристалла три взаимно-перпендикулярные оси (что, при дальнейшем развитии науки, оказалось прямо нелепостью), пытаясь найти простые числовые соотношения в величинах отрезков осей» [8].

Однако несомненной заслугой Вейса является установление кристаллографических систем (сингоний), описанных в статье «Наглядное изложение естественного деления систем кристаллизации» [25]. Резко противопоставляя кубическую систему (сингонию) всем остальным, Вейс называет ее правильной, сфероэдрической или равноосной. Характерным для кубических кристаллов является наличие трех взаимноперпендикулярных осей с равными единицами измерения вдоль них.

Главными формами этой системы по Вейсу являются октаэдр, куб и ромбо-додекаэдр («гранатоэдр»). Все остальные формы выводятся из них. Например, 48-гранник (по Вейсу «пирамидальный гранатоэдр») можно получить из ромбо-додекаэдра («гранатоэдра»), если каждую ромбическую грань последнего покрыть четырехгранными пирамидами с гранями в виде одинаковых неравносторонних треугольников.

Все простые формы кубической системы делятся на «полногранные» и «неполногранные». К первым, например, относится октаэдр, ко вторым — тетраэдр, обладающий половиной граней по сравнению с октаэдром. Тетраэдр получается из октаэдра путем удаления одной из каждой двух соседних граней. Подобным же образом получается пентагон-додекаэдр из пирамидального куба (тетрагексаэдра) и т.п.

На основании такого подразделения форм Вейс делит правильную (кубическую) систему на два больших подразделения: 1) гомосфероэдрическую систему, формы которой имеют полное число граней, и 2) гемисфероэдрическую систему, формы которой имеют половинное число граней (к ней относятся тетраэдрическое и пентагон-додекаэдрическое подразделения).

Правильной (кубической) системе противопоставляются, с одной стороны, системы с тремя взаимноперпендикулярными осями, где, однако, не все три оси равны между собой. Сюда относятся четырехчленная (тетрагональная система, в которой две оси равны, а третья не равна), а также двух- и двухчленная (ромбическая), двух- и одночленная (моноклинная), одно- и одночленная (триклиническая) системы, где все три оси не равны¹.

С другой стороны, Вейс отличает системы, в основание которых положены не три взаимноперпендикулярные оси. Сюда относятся шестичленная (гексагональная) и трехчленная (тригональная) системы. В них одна неравная ось перпендикулярна трем равным осям, образующим между собой углы в 120°.

В работе Вейса поражает полное отсутствие каких бы то ни было четких указаний на симметрию кристаллов, хотя вся классификация основана на различии осей симметрии, что нашло себе выражение и в названиях сингоний (систем) [25].

Вскоре после выхода в свет работы Вейса начались ожесточенные дебаты по поводу приоритета установления сингоний. Одни приписывали честь этого открытия Вейсу, другие указывали на то, что еще до опубликования статьи Вейса профессор минера-

¹ Вейс в отличие от ныне существующей установки для моноклинной и триклинической сингоний также принимал прямоугольную систему координат. Разбирая простые формы этих сингоний, Вейс всюду подчеркивает их аналогию с формами кубической сингонии, отразив это и в названиях. Так, например, тетрагональная дипирамида называется им «квадратным октаэдром», ромбическая дипирамида — «ромбическим октаэдром» и т. п.

логии в Вене Ф. Мос (1773—1839) в своих лекциях подразделял кристаллы на те же системы¹. В «Основах минералогии», появившихся в 1822 г., Ф. Мос описывает свою классификацию кристаллов [26]. Так же, как и Вейс, он определяет кристаллические формы с помощью кристаллографических осей, но для моноклинных и триклинических кристаллов принимает непрямоугольные системы. В этом отношении им сделан шаг вперед по сравнению с Вейсом.

Приведем названия сингоний, предложенные Мосом: тессулярная (кубическая), пирамидальная (тетрагональная), ромбоэдрическая (гексагональная и тригональная), призматическая (ромбическая), гемипризматическая (моноклинная), тетартопризматическая (триклиническая).

Классификация кристаллографических систем по координатным осям без учета симметрии привела к тому, что некоторые авторы выделяли особую диклиноэдрическую систему, характеризовавшуюся двумя косыми углами и одним прямым углом между кристаллографическими осями (Митчерлих, К. Ф. Науманн, Н. И. Кокшаров). Несостоятельность выделения такой системы была доказана А. В. Гадолиным [9].

Впоследствии учение о сингониях в кристаллографии было до конца развито в трудах Е. С. Федорова [27, 28].

На фоне формальной школы прошлого столетия совершенно терялись единичные попытки отдельных ученых подвести обобщающую теоретическую базу под огромный материал, накопленный долголетними наблюдениями и исследованиями.

И. Ф. Гессель (1796—1872), полностью разработал в 1830 г. теорию симметрии для конечных фигур, в том числе и для кристаллических многогранников [29]. Он вывел впервые 32 вида симметрии — 32 возможные совокупности элементов симметрии, характеризующие геометрию кристаллических форм.

В чертежах, сопровождающих сочинение Гесселя, изображены все 47 простых кристаллографических форм. Однако современники Гесселя прошли мимо этих замечательных результатов (о них вспомнили лишь через шестьдесят лет после их опубликования).

Последователи Х. Вейса во главе с К. Ф. Науманном пытались на основе одних лишь внешних наблюдений найти все существующие формы кристаллов. Такой подход не мог не привести к многочисленным ошибкам и пропускам.

Так, например, в русском переводе науманновской «Минералогии» (1860) [10] из кубических форм отсутствуют пентагон-триоктаэдр и пентагон-тритетраэдр. Среди форм средних сингоний

¹ Имя Ф. Мosa памятно главным образом по общеизвестной школе твердости (шкала Мosa до сих пор употребляется в минералогической практике).

нет пирамид, трапециэдров, дитригональных призм и дипирамид. Для низших сингоний отсутствуют ромбические пирамиды, диэдры и моноэдры. Дипирамиды всюду называются «пирамидами».

В связи с отсутствием точного понятия простой формы, в низших сингониях комбинация из двух ромбических призм принимается за одну форму — «моноклинную пирамиду» (дипирамиду), а комбинация из четырех пинакоидов — за «триклиническую пирамиду» (дипирамиду).

Интенсивное изучение реальных кристаллических многогранников привело к тому, что в каждом новом издании появлялись все новые и новые формы. Так, например, в русских «Лекциях минералогии» 1863 г. акад. Н. И. Кокшарова находятся уже все 15 простых форм кубической сингонии (табл. 3) [11].

Появляются у Н. И. Кокшарова и трапециэдры. По прежнему отсутствуют пирамиды (под названием «пирамид» подразумеваются дипирамиды), диэдры, моноэдры. Вместе с тем упорно продолжают фигурировать моноклинные и триклинические «пирамиды». И все это мучительное выявление форм, изобиловавшее ложными шагами и требовавшее огромной затраты труда, производилось, несмотря на наличие исчерпывающего вопрос старинного вывода И. Ф. Гесселя.

Полное забвение сочинения Гесселя привело к тому, что 37 лет спустя после опубликования его основной работы, в 1867 г. А. В. Гадолин (1827—1892), не подозревая о своем предшественнике, вторично открывает геометрический закон симметрии для кристаллических многогранников [9]. Его изящный и наглядный вывод 32 видов симметрии получил всеобщее признание, поколебав, наконец, устои царившей немецкой кристаллографической школы Науманна. Успеху вывода А. В. Гадолина среди минералогов особенно способствовало обилие эффектных примеров из области минералогии. В работе подробно разобраны все общие простые формы (часть их появляется в литературе после Гесселя впервые). Список и номенклатура этих форм приведены в табл. 4.

Полный вывод простых форм на основании 32 видов симметрии, их исчерпывающая классификация и номенклатура были даны в известных курсах Кристаллографии Е. С. Федорова (табл. 5) [12—15]. Систематика и номенклатура Е. С. Федорова была широко распространена по всему миру известным немецким кристаллографом П. Гротом (1843—1927). Федоровско — Гротовская номенклатура надолго завоевала всеобщее признание. Таким образом, учение о формах кристаллических многогранников к началу нынешнего столетия принимает тот вид, который нам хорошо известен по элементарным руководствам.

Таблица 3

Названия простых форм	
по Н. И. Кокшарову *	современные термины
Правильная система — кубическая сингония	
Тетраэдр	Кубический тетраэдр
Куб (гексаэдр)	Гексаэдр
Октаэдр (правильный октаэдр)	Октаэдр
Ромбический додекаэдр (гранатоэдр)	Ромбо-додекаэдр
Пентагональный додекаэдр	Пентагон-додекаэдр
Пирамидальный тетраэдр (тригон-додекаэдр)	Тригон-тритетраэдр
Дельтоэдр (дельтоид-додекаэдр)	Тетрагон-тритетраэдр
Тетартоэдр (тетраэдрический пентагональный додекаэдр)	Пентагон-тритетраэдр
Преломленный пирамидальный тетраэдр (гексатетраэдр)	Гексатетраэдр
Пирамидальный куб (тетракисгексаэдр)	Тетрагексаэдр
Преломленный пентагональный додекаэдр (диакисдодекаэдр)	Дидодекаэдр
Пирамидальный октаэдр (триакисоктаэдр)	Тригон-триоктаэдр
Трапециоэдр (икоситетраэдр)	Тетрагон-триоктаэдр
Гироэдр (пентагональный икоситетраэдр)	Пентагон-триоктаэдр
Сорокавосьмигранник (гексакисоктаэдр)	Гексоктаэдр
Тетрагональная (квадратная) система — тетрагональная сингония	
Тетрагональная (квадратная) призма	Тетрагональная призма
Дитетрагональная (симметрическая восьмиугольная призма)	Дитетрагональная призма
Тетрагональная (квадратная) пирамида (квадратный октаэдр)	Тетрагональная дипирамида
Дитетрагональная (восьмиугольная) пирамида	Дитетрагональная дипирамида
Тетрагональный сфеноид	Тетрагональный тетраэдр
Тетрагональный трапециоэдр	Тетрагональный трапециоэдр
Тетрагональный скаленоэдр	Тетрагональный скаленоэдр
Основной пинакоид	Пинакоид
Гексагональная (шестиугольная) система — гексагональная и тригональная сингонии	
Тригональная призма	Тригональная призма
Дитетригональная призма	Дитетригональная призма
Тригональная пирамида	Тригональная дипирамида

* Терминология Н. И. Кокшарова близка к номенклатуре Науманна.

Продолжение табл. 3

Названия простых форм	
по Н. И. Кокшарову	современные термины
Гексагональная (шестиугольная) система — ромбическая сингония	
Гексагональная (правильная шестиугольная, шестисторонняя) призма	Гексагональная призма
Дигексагональная (симметрическая, двенадцатигранная) призма	Дигексагональная призма
Гексагональная (шестиугольная, двойная шестисторонняя пирамида, дигексаэдр)	Гексагональная дипирамида
Дигексагональная (двенадцатигранная) пирамида	Дигексагональная дипирамида
Ромбоэдр	Ромбоэдр
Гексагональный трапециоэдр	Гексагональный трапециоэдр
Гексагональный скаленоэдр	Дигексагональный скаленоэдр
Основной пинакоид	Пинакоид
Ромбическая (орторомбическая) система — ромбическая сингония	
Ромбическая пирамида (ромбический октаэдр)	Ромбическая дипирамида
Ромбическая призма	Ромбическая призма типа {hko}
Макродома	Ромбическая призма типа {hol}
Брахидома	Ромбическая призма типа {okl}
Ромбический сфеноид	Ромбический тетраэдр
Макропинакоид	1-й пинакоид {100}
Брахипинакоид	2-й пинакоид {010}
Базопинакоид	3-й пинакоид {001}
Моноклиноэдрическая система — моноклинная сингония	
Моноклиноэдрическая пирамида	Комбинация двух ромбических призм
Моноклиноэдрическая призма	Ромбическая призма типа {hko}
Клинодома	Ромбическая призма типа {okl}
Ортодома	Четырехгранная комбинация из двух пинакоидов типа {hol}
Ортопинакоид	1-й пинакоид {100}
Клинопинакоид	2-й пинакоид {010}
Базопинакоид	3-й пинакоид {001}
Дикилиноэдрическая система *	
Дикилиноэдрическая пирамида	Триклинина комбинация из четырех пинакоидов
Дикилиноэдрическая призма	Триклинина комбинация из двух пинакоидов

* Несуществующая сингония с двумя косыми углами и одним прямым углом между координатными осями.

Продолжение табл. 3

Названия простых форм	
по Н. И. Кокшарову	современные термины
Триклиноэдрическая система — триклинная сингония	
Триклиноэдрическая пирамида	Триклинная комбинация из четырех пинакоидов типа $\{hkl\}$
Триклиноэдрическая призма	Комбинация из двух пинакоидов типа $\{hko\}$
Макродома	Комбинация из двух пинакоидов типа $\{hol\}$
Брахидома	Комбинация из двух пинакоидов типа $\{okl\}$
Макропинакоид	1-й пинакоид $\{100\}$
Брахипинакоид	2-й пинакоид $\{010\}$
Базопинакоид	3-й пинакоид $\{001\}$

С историей геометрического учения о формах кристаллов теснейшим образом связано развитие учения о кристаллографических символах.

Уже Гаюи осознал необходимость математически точных характеристик для форм кристаллов и с этой целью разработал свою систему символов. Сейчас эта отошедшая в область истории система представляет для нас интерес потому, что она всецело основана на теории кристаллического строения Гаюи. Символы Гаюи являются в своем роде «структурными символами».

Как указано выше, по теории Гаюи кристаллы слагаются из элементарных многогранников. Такие частицы, присоединяясь друг к другу, образуют на основных гранях кристалла постройки в виде ступенчатых лестниц. Поднимаясь от одной ступеньки к другой, мы констатируем закономерное убывание частиц, входящих в состав ступенек. Каждой кристаллографической форме отвечает свой строго определенный «закон убывания». С помощью законов убывания, Гаюи и разработал свою кристаллографическую символику. В основу ее он кладет упомянутые выше примитивные формы. Вершины и ребра примитивной формы обозначаются специальными буквами (симметричным частям приписываются одинаковые буквы). Буквы сопровождаются цифрами, характеризующими закон убывания, имеющий место для того или иного ребра или вершины и дающий в результате ту или иную вторичную форму.

Таблица 4

Названия общих форм ¹	
по А. В. Гадолину	современные термины ²
Правильная система	Кубическая сингония
48-гранник	Гексоктаэдр
Пентагональный 24-гранник	Пентагон-триоктаэдр
Гексакис-тетраэдр	Гексатетраэдр
Диакис-додекаэдр (или ломаный пентагональный додекаэдр)	Дидодекаэдр
Тетраэдрический пентагональный додекаэдр	Пентагон-тритетраэдр
Квадратная система	Тетрагональная сингония
Дитетрагональная пирамида	Дитетрагональная дипирамида
Тетрагональный трапециоэдр	Тетрагональный трапециоэдр
Тетрагональный скаленоэдр	Тетрагональный скаленоэдр
Квадратная пирамида	Тетрагональная дипирамида
Тетрагональный сфеноид	Тетрагональный тетраэдр
Половина дитетрагональной пирамиды	Дитетрагональная пирамида
Половина квадратной пирамиды	Тетрагональная пирамида
Гексагональная система	Гексагональная и тригональная сингония
Дигексагональная пирамида	Дигексагональная дипирамида
Гексагональный трапециоэдр	Гексагональный трапециоэдр
Гексагональная пирамида	Гексагональная дипирамида
Дитригональная пирамида	Дитригональная дипирамида
Тригональная пирамида	Тригональная дипирамида
Половина дигексагональной пирамиды	Дигексагональная пирамида
Половина гексагональной пирамиды	Гексагональная пирамида
Гексагональный скаленоэдр	Дитригональный скаленоэдр
Ромбоэдр	Ромбоэдр
Тригональный трапециоэдр	Тригональный трапециоэдр
Половина дитригональной пирамиды	Дитригональная пирамида
Половина тригональной пирамиды	Тригональная пирамида
Ромбическая система	Ромбическая сингония
Ромбический октаэдр	Ромбическая дипирамида
Ромбический сфеноид	Ромбический тетраэдр
Половина ромбического октаэдра	Ромбическая пирамида
Моноклиноэдрическая система	Моноклинная сингония
Моноклиноэдрическая полупирамида	Ромбическая призма
Половина полупирамиды (гемиздрия)	Диздр плоскостной
Половина полупирамиды (гемиморфия)	Диздр осевой
Триклиноэдрическая система	Триклинная сингония
Две параллельные плоскости	Пинакоид
Одна отдельная грань	Моноздр

¹ Напомним, что общей формой называется простая форма, грани которой располагаются косо относительно осей и плоскостей симметрии.

² Номенклатура Федоровского института.

Таблица 5

Названия простых форм по Е. С. Федорову и П. Гроту¹

Кубическая сингония

Тетраэдр	Тетраэдр (правильный)
Куб (гексаэдр)	Гексаэдр
Октаэдр	Октаэдр
Ромбический додекаэдр (ромбо-до-декаэдр)	Ромбо-додекаэдр
Пентагональный додекаэдр (пента-гон-додекаэдр)	Пентагон-додекаэдр
Пирамидальный тетраэдр (триакис-стетраэдр)	Тригон-тритетраэдр
Триakis-тетраэдр (дельтоиддодека-эдр)	Тетрагон-тритетраэдр
Тетартодра (тетраэдрический пента-гон-додекаэдр)	Пентагон-тритетраэдр
Гексакистетраэдр	Гексатетраэдр
Пирамидальный куб (тетракисгекса-эдр)	Тетрагексаэдр
Диакис-додекаэдр	Дидодекаэдр
Пирамидальный октаэдр (триакис-октаэдр)	Тригон-триоктаэдр
Триакисоктаэдр (икоситетраэдр)	Тетрагон-триоктаэдр
Гироэдр (пентагоникоситетраэдр)	Пентагон-триоктаэдр
Гексакисоктаэдр	Гексоктаэдр

Тетрагональная сингония

Тетрагональная призма
Тетрагональная пирамида
Дитетрагональная пирамида

Тетрагональная бипирамида	Тетрагональная дипирамида
Дитетрагональная бипирамида	Дитетрагональная дипирамида
Тетрагональный сфеноэдр (тетрагональный дисфеноид)	Тетрагональный тетраэдр

Тетрагональный скаленоэдр
Тетрагональный трапециоэдр

Гексагональная сингония

Тигональная призма
Дитигональная призма
Гексагональная призма
Тригональная пирамида
Дитригональная пирамида
Гексагональная пирамида
Дигексагональная пирамида

¹ Слова названия простых форм по Е. С. Федорову (Е. С. Федоров «Сокращенный курс кристаллографии», 1910). Слова же в скобках — названия по П. Гроту. Справа — современные термины.

Продолжение табл. 5

Тригональная бипирамида	Тригональная дипирамида
Дитригональная бипирамида	Дитригональная дипирамида
Гексагональная бипирамида	Гексагональная дипирамида
Дигексагональная бипирамида	Дигексагональная дипирамида

Ромбоэдр	Ромбоэдр
Дитригональный скаленоэдр	Дитригональный трапециоэдр
Тригональный трапециоэдр	Гексагональный трапециоэдр

Ромбическая, моноклинная и триклинистая сингонии

Гемипинакоид (педион)	Моноэдр
Гемипризма безосная (дома)	Пинакоид
Гемипризма осевая (сфеноид)	Диздр безосный

Диздр осевой	Диздр осевой
--------------	--------------

Ромбическая призма
Ромбическая пирамида

Ромбический сфеноэдр (дисфеноид)	Ромбический тетраэдр
Ромбическая бипирамида	Ромбическая дипирамида

В качестве примера рассмотрим косоугольный параллелепипед, представляющий, по Гаю, основное ядро полевого шпата (рис. 1).

Вершины параллелепипеда обозначены гласными буквами следуя алфавиту: *A, E, I, O*. Ребрам соответствуют согласные буквы: *B, C, D, G, H*. Границы основной формы отмечены буквами *P, M, T* (начальные буквы слов в слове *Primitiv*). Пусть вершина *O* рассматриваемого параллелепипеда притуплена гранией вторичной формы. Такая грань может получиться путем убывания по направлению к грани *P*, либо *T*, либо *M*. В первом случае цифра ставится над буквой, во втором — справа от нее, в третьем — слева. Так, например, символ *O* указывает на убывание в два ряда шириной параллельно диагонали *EI* основной грани *P*. Таким же образом *O³* соответствует убыванию в три ряда параллельно диагонали *Ia* грани *T*. Наконец, *O⁴* обозначает убывание в четыре ряда по диагонали *Ea* грани *M*.

Убывание частиц по ребрам *B, C, D, F* также обозначается соответственно расставленными цифрами. Например, *D* обозна-

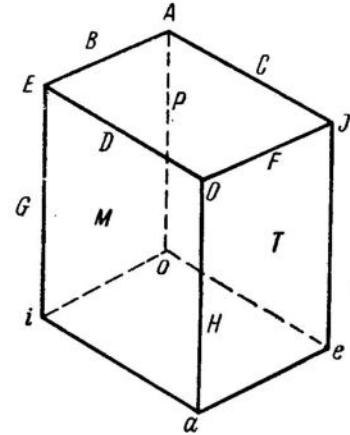


Рис. 1

чает убывание в два ряда, направленное от ребра к C ; D — убывание в три ряда, идущее от ребра D к грани M ; $4H$ — убывание в четыре ряда, направленное от H к G , и т. д.

Выше указывалось, что символы Гаюи представляют интерес как первая попытка обозначения внешних форм с помощью примитивной формы, т. е. внутреннего строения кристаллов.

В дальнейшем учение о кристаллографических символах базировалось на законе рациональности отношений параметров, отвечающем вышеупомянутому закону Гаюи, хотя и сформулированному в иных словах. Из курса элементарной кристаллографии известно, что, исходя из этого закона, мы выбираем за кристаллографические оси ребра кристаллов (или оси симметрии) и вычисляем двойные отношения отрезков, отсекаемых гранями на данных осиях. При этом одна из граней, пересекающая координатные оси, принимается за единичную (отрезки, отсекаемые ею на координатных осиях, являются единицами измерения или масштабами для соответственных осей).

Если отрезки, отсекаемые гранью X на трех осиях, обозначить через OA_x , OB_x и OC_x , а соответственные отрезки, отсекаемые единичной гранью, через OA_1 , OB_1 и OC_1 , то согласно закону рациональности отношений параметров, получаем

$$\frac{OA_x}{OA_1} : \frac{OB_x}{OB_1} : \frac{OC_x}{OC_1} = K : L : M,$$

где K , L , M — целые и обычно малые числа, редко превышающие 10.

Школа немецких кристаллографов с Вейсом и Науманном во главе пользовалась для нахождения символов этим уравнением. Однако в их символике математическая сторона не выделялась до конца. Некоторые формы обозначались буквами, повторяющиеся цифры иногда опускались и т. д. Несмотря на эти недостатки, символы Вейса и Науманна долго держались в минералогической литературе. Ими пользовались, например, Н. И. Кокшаров, П. В. Еремеев и др.

В 1839 г. В. Миллер (1801—1880) предложил видоизменить приведенное выше выражение для символа грани следующим образом [30]

$$\frac{OA_1}{OA_x} : \frac{OB_1}{OB_x} : \frac{OC_1}{OC_x} .$$

В конце прошлого столетия почти все минералоги и кристаллографы перешли на символы Миллера.

«Символы Миллера являются единственными допустимыми символами», — писал по этому поводу Е. С. Федоров [31].

Этими символами повсеместно пользуются и сейчас при описании кристаллов (за исключением кристаллов гексагональной и тригональной сингоний, для которых обычно даются четырехчленные символы Браве или Федорова).

Дальнейшая история учения о кристаллографических символах связана с вопросом о правильной установке кристаллов. Вейс, Науманн и Миллер, отказавшись от структурной основы Гаюи, выбирали кристаллографические оси и единичные грани более или менее произвольно. В связи с этим отсутствовала однозначность установок в описаниях одних и тех же кристаллов у разных авторов. Одни и те же грани обозначались у них различными символами. Такой разнобой мог быть уничтожен лишь введением правил строго однозначных установок, основанных на структуре кристаллов.

Попытку выработать правила структурной строго однозначной установки дал Е. С. Федоров в «Царстве кристаллов» [32]. Эти правила исходят из федоровской теории строения кристаллов и основываются на его законе, согласно которому все кристаллы принадлежат либо кубическому, либо гексагональному типам. Свои правила Е. С. Федоров сформулировал до открытия рентгеноанализа и до появления описания реальных структур.

В настоящее время в связи с тем, что структуры огромного количества минералов расшифрованы, давно назрел вопрос о пересмотре принятых в литературе установок минералов и замене их единственными правильными структурными установками.

В минералогической литературе (главным образом старой) нередко встречаются различные системы кристаллографических символов.

Французские минералоги часто пользовались символикой Леви, отправным пунктом для которой послужила система Гаюи.

Немецкие и русские ученые прошлого столетия широко употребляли символы Вейса и Науманна.

В сравнительных табл. 6—11 сопоставлены различные системы кристаллографических символов.

На основе символов в старой минералогической литературе простые формы одного и того же вида подразделялись на отдельные роды. Так, например, различали ромбические призмы, 1, 2, 3 и 4-го родов. Такое подразделение форм, представляющее собой как бы первый шаг к установлению кристаллографически различных простых форм, недавно установленных Г. Б. Бокилем [16], приводится в табл. 10.

Сравнительные таблицы разных систем кристаллографических символов

Таблица 6

Кубическая сингония

Название формы	Миллер	Наумани	Леви
Гексаэдр (куб)	100	$\sim O \sim$	P
Октаэдр тетраэдр ($\frac{1}{2}$)	111	O	a'
Ромбо-додекаэдр	110	$\sim O$	b'
Тетрагексаэдр, пентагон-додекаэдр ($\frac{1}{2}$)	hko	$\sim O \frac{h}{k}$	$b \frac{k}{h}$
Тетрагон-триоктаэдр, тригонтритетраэдр ($\frac{1}{2}$)	hkk	$\frac{h}{k} O \frac{h}{k}$	$\frac{h}{a} \frac{k}{k}$
Тригон-триоктаэдр, тетрагонтритетраэдр ($\frac{1}{2}$)	$hh\bar{l}$	$\frac{h}{l} O$	$\frac{l}{a} \frac{k}{k}$
Гексоктаэдр, пентагон-триоктаэдр ($\frac{1}{2}$)	hkl	$\frac{h}{l} O \frac{h}{k}$	$\frac{1}{b} \frac{1}{b} \frac{1}{b}$
Гексатетраэдр ($\frac{1}{2}$), дидодекаэдр ($\frac{1}{2}$), пентагон-тритетраэдр ($\frac{1}{4}$)		$\frac{h}{l} O \frac{h}{k}$	$b \frac{l}{b} b \frac{k}{b} b \frac{h}{b}$

Таблица 7

Гексагональная сингония

Название формы	Браве	Наумани	Леви	Федоров
Моноэдр, пинакоид	0001	OP	p	1000
Призмы гексагональная и тригональная.	$10\bar{1}0$	$\sim P$	m	0011
То же	$11\bar{2}0$	$\sim P2$	h'	0121
Призмы гексагональная, тригональная, дигексагональная, дитригональная	$h\bar{k}O$	$\sim P \frac{k}{h}$	$\frac{h}{h} i$	$Oikh$
Гексагональная пирамида, гексагональная дипирамида, тригональная дипирамида	$10\bar{1}1$	P	b'	1011
То же	$11\bar{2}1$	$2P2$	a'	1121
» »	$h\bar{o}l$	$\frac{h}{l} P$	$\frac{l}{b} h$	$lohh$

Продолжение табл. 7

Название формы	Браве	Наумани	Леви	Федоров
Гексагональная пирамида, гексагональная дипирамида, тригональная дипирамида	$hh2\bar{h}l$	$P2$	$\frac{l}{a} \frac{h}{h}$	$lh2hh$
Гексагональная пирамида и дипирамида, тригональная дипирамида, дигексагональные пирамида и дипирамида, дитригональная дипирамида, гексагональный трапециэдр	$hikl$	$\frac{k}{l} P \frac{k}{h}$	$b^i b^h b^l$	$likh$

Таблица 8

Тригональная сингония¹

Название формы	Миллер	Браве	Наумани	Леви
Пинакоид	111	0001	OR	a^1
Гексагональная призма	112	$10\bar{1}0$	$\sim R$	t^2
» »	$10\bar{1}$	$11\bar{2}0$	$\sim R2$	d^1
Ромбоэдр	100	$10\bar{1}1$	$+R$	P
Гексагональная дипирамида	412	$11\bar{2}1$	$2P2$	$\frac{1}{b^2} d^1 d^4$
Тригональный скаленоэдр	hkl	$(h-k) (k-l) (l-h) + \frac{h-l}{h+k+l} R$	$\frac{1}{b} \frac{1}{b} \frac{1}{b}$	$\frac{h-l}{h+k}$

¹ Указаны только некоторые формы планкационального вида симметрии (CG_3G_33P), так как трехзначные символы Миллера используются лишь для кристаллов с выраженным ромбоэдрическим обликом.

Таблица 9

Ромбическая сингония

Название формы	Миллер	Науманн	Леви
Пинакоид	100	$\sim P \sim$	g^1
»	010	$\sim \bar{P} \sim$	h^1
Пинакоид, моноэдр	001	OP	p
Ромбическая призма	110	$\sim P$	m
» »	hkO	$\sim \tilde{P} \frac{k}{h}$	$h \frac{h+k}{k-h}$
Ромбическая призма, диэдр	101	$\overset{\vee}{P} \sim$	l^1
» » »	hol	$\frac{h}{l} \overset{\vee}{P} \sim$	$l \frac{l}{h}$
» » »	011	$P \sim$	a^1
» » »	Okl	$\frac{k}{l} P \sim$	$a \frac{l}{k}$
Ромбическая дипирамида, пирамида, тетраэдр	111	P	$b \frac{1}{2}$
То же	hkl	$\frac{h}{l} \bar{P} \frac{h}{k}$	$b \frac{1}{h-k} b \frac{1}{h+k} g \frac{1}{l}$

Таблица 10

Моноклинная сингония

Пинакоид, моноэдр	100	$\sim P \sim$	h^1
» »	010	$\sim \bar{P} \sim$	g^1
» »	001	OP	p
» »	101	$\sim \bar{P} \sim$	o^1

Продолжение табл. 10

Название формы	Миллер	Науманн	Леви
Пинакоид, моноэдр	hol	$-\frac{h}{l} P \sim$	$O \frac{l}{h}$
Ромбическая призма, диэдр	110	$\sim \bar{P}$	m
» » »	hkO	$\sim P \frac{h}{k}$	$h \frac{h+k}{h-k}$
» » »	011	$\bar{P} \sim$	l^1
» » »	Okl	$\frac{k}{l} \bar{P} \sim$	$\frac{l}{l^k}$
» » »	111	$\sim P$	$\frac{1}{d^2}$
» » »	hkl	$-\frac{h}{l} P \frac{h}{k}$	$d \frac{1}{k-h} b \frac{1}{h+k} g \frac{1}{l}$

Таблица 11

Триклинная сингония

Пинакоид, моноэдр	100	$\sim \bar{P} \sim$	h^1
» »	010	$\sim P \sim$	g^1
» »	001	OP	h^1
» »	110	$\sim \bar{P}^1$	t
» »	110	$\sim \bar{P}^1$	m
» »	hkO	$\sim \overset{\vee}{P}_1 \frac{k}{h}$	$\frac{h+k}{k-h}$
» »	hol	$\frac{h}{l} \bar{P}^1 \sim$	$O \frac{l}{h}$
» »	Okl	$\frac{k}{l_1} \overset{\vee}{P} \sim$	$t \frac{l}{k}$
» »	111	P^1	$\frac{1}{f^2}$
» »	hkl	$\frac{h}{l} \overset{\vee}{P} \frac{k}{h}$	$f \frac{1}{k-h} c \frac{1}{h+k} g \frac{1}{l}$

Таблица 12

Подразделение простых форм на основании их символов
Формы кубической сингонии

Пентагон-тритетраэдр: правый положительный	$\{hkl\}$
» отрицательный	$\{\bar{h}\bar{k}l\}$
левый положительный	$\{hkl\}$
» отрицательный	$\{k\bar{h}l\}$
Дододекаэдр: правый	$\{kh\bar{l}\}$
» левый	$\{h\bar{k}l\}$
Гексатетраэдр: положительный	$\{hkl\}$
отрицательный	$\{\bar{h}\bar{k}l\}$
Пентагон-триоктаэдр: правый	$\{kh\bar{l}\}$
левый	$\{h\bar{k}l\}$
Тетраэдр: положительный	$\{111\}$
отрицательный	$\{1\bar{1}\bar{1}\}$
Тригон-тритетраэдр: положительный	$\{hkk\}$
отрицательный	$\{h\bar{k}\bar{k}\}$
Тетрагон-тритетраэдр: положительный	$\{hh\bar{l}\}$
отрицательный	$\{h\bar{h}l\}$
Пентагон-додекаэдр: правый	$\{khO\}$
левый	$\{h\bar{k}O\}$

Продолжение табл. 12

Формы средних сингоний

Тетрагональная призма: 1-го рода	$\{110\}$
2-го »	$\{100\}$
3-го »	$\{\bar{h}kO\}$
Тригональная призма: 1-го рода	$\{10\bar{1}0\}$
2-го »	$\{11\bar{2}0\}$
3-го »	$\{h\bar{k}l\}$
Гексагональная призма: 1-го рода	$\{10\bar{1}0\}$
2-го »	$\{11\bar{2}0\}$
3-го »	$\{h\bar{i}\bar{k}O\}$
Тетрагональная пирамида: 1-го рода	$\{hh\bar{l}\}$
2-го »	$\{hol\}$
3-го »	$\{hkl\}$
Тригональная пирамида: 1-го рода	$\{io\bar{l}l\}$
2-го рода	$\{ii2\bar{ll}\}$
3-го »	$\{h\bar{i}\bar{k}l\}$
Гексагональная пирамида: 1-го рода	$\{io\bar{l}l\}$
2-го »	$\{ii2\bar{l}l\}$
3-го »	$\{h\bar{i}\bar{k}l\}$
Тетрагональная дипирамида: 1-го рода	$\{hh\bar{l}\}$

Продолжение табл. 12

Тетрагональная дипирамида: 2-го рода	$\{hol\}$
3-го »	$\{hkl\}$
Тригональная дипирамида: 1-го рода	$\{io\bar{l}\}$
2-го »	$\{ii\bar{2}il\}$
3-го »	$\{hi\bar{k}l\}$
Гексагональная дипирамида: 1-го рода	$\{io\bar{l}\}$
2-го »	$\{ii\bar{2}il\}$
3-го »	$\{hi\bar{k}l\}$
Тетрагональный тетраэдр: 1-го рода	$\{hhI\}$
2-го »	$\{hol\}$
3-го »	$\{hkl\}$
Ромбоэдр: 1-го рода	$\{io\bar{l}\}$
» 2-го »	$\{ii\bar{2}il\}$
» 3-го »	$\{hi\bar{k}l\}$
Тетрагональный трапециоэдр: правый	$\{hkl\}$
левый	$\{h\bar{k}l\}$
Тригональный трапециоэдр: правый	$\{ih\bar{k}l\}$
левый	$\{k\bar{h}il\}$
Гексагональный трапециоэдр: правый	$\{ih\bar{k}l\}$
левый	$\{k\bar{h}il\}$

Продолжение табл. 12

Формы низших сингоний	
1-й моноэдр	$\{100\}$
2-й »	$\{010\}$
3-й »	$\{001\}$
Моноэдр: 1-го рода	$\{Okl\}$
2-го »	$\{hol\}$
3-го »	$\{hkO\}$
4-го »	$\{hkl\}$
1-й пинаконд	$\{100\}$
2-й »	$\{010\}$
3-й »	$\{001\}$
Пинаконд: 1-го рода	$\{Okl\}$
2-го »	$\{hol\}$
3-го »	$\{hkO\}$
4-го »	$\{hkl\}$
Диэдр безосный: 1-го рода	$\{Okl\}$
2-го »	$\{hol\}$
3-го »	$\{hkO\}$
4-го »	$\{hkl\}$
Диэдр осевой: 1-го рода	$\{Okl\}$

Продолжение табл. 12

Диэдр осевой: 2-го рода	$\{hol\}$
3-го »	$\{hko\}$
4-го »	$\{hkl\}$
Ромбическая призма: 1-го рода	$\{Okl\}$
2-го »	$\{hol\}$
3-го »	$\{hko\}$
4-го »	$\{hkl\}$
Ромбический тетраэдр: правый	$\{hkl\}$
левый	$\{hkl\}$

15. Федоров Е. С. Сокращенный курс кристаллографии; СПб., 1910.
16. Бокий Г. Б. Число физически различных простых форм кристаллов. Труды Лаборатории кристаллографии АН СССР, 1940, вып. 2.
17. Шафрановский И. И. Формы кристаллов. Труды Института кристаллографии АН СССР, 1948, вып. 4.
18. Steponis N. De solido intra solidum naturaliter contento, 1769.
19. De Buffon M. Histoire naturelle des Mineraux, 1783, p. 343.
20. Linnaeus C. Systema Naturae of Linnaeus, 1735.
21. Romé de l'Isle. Essai de cristallographie, 1772.
22. Romé de l'Isle. Cristallographie ou description des formes propres à tous les corps du règne minéral, 1783.
23. Werner A. G. Von d. äusserlichen Kennzeichnen d. Fossilien, 1774.
24. Haüy R. J. Essai d'une théorie sur la structure des cristaux appliquée à plusieurs genres de substances crystallisées, 1783.
25. Weiss Ch. S. Ueber die natürlichen Abtheilungen der Krystallisationsysteme, Abhandlungen d. physikalischen Klasse d. Königlich-Preussischen Akademie d. Wissenschaften, 1813—1815.
26. Mohs F. Grundriss d. Mineralogie, 1822.
27. Fedorow E. Zeits. f. Krist. u. Min., 1896, Bd. 28, S. 36—68.
28. Fedorow E. Abh. d. Bayer. Acad. d. Wiss. Mat.—Phys. Cl., 1906, Bd. 23, A. H. I.
29. Hessel I. F. Krystallometrie oder Krystallonomie u. Krystallographie. Ostwald's Klassiker d. exakten Wissenschaften, 1897, № 88, 89.
30. Miller W. H. A Treatise on Crystallography, 1839.
31. Fedorow E. Zeits. f. Krist. u. Min., 1895, Bd. 26, S. 132—135.
32. Fedorow E. Das Krystallreich. Tabellen zur Krystallochemischen Analyse. Записки Академии Наук по физ.-мат. отд., 1920, серия VIII, т. 36.

ЛИТЕРАТУРА

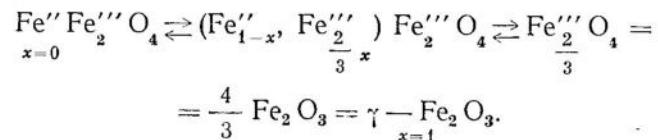
1. Плиний К. Естественная история ископаемых тел, переведенная на русский язык в азбучном порядке и примечаниями, дополненная трудами Василия Севергина. СПб., изд. Акад. наук, 1819.
2. Уэвелль В. История индуктивных наук. Перев. М. А. Антоновича. 1869, стр. 264.
3. Ломоносов М. В. О рождении и природе селитры. Соч., т. 2, изд. АН СССР, 1951, стр. 219—319.
4. Ломоносов М. В. Слово о рождении металлов от трясения земли. Полное собрание сочинений, т. 5, изд. АН СССР, 1954.
5. Ломоносов М. В. О слоях земных. Полное собрание сочинений, т. V, стр. 599, изд. АН СССР, 1954.
6. Севергин В. М. Начальные основания естественной истории, содержащие царства животных, произрастаний и ископаемых. Царство ископаемых. СПб., 1791.
7. Севергин В. М. Подробный словарь минералогический, СПб., 1807.
8. Федоров Е. С. Из итогов тридцатипятилетия. 1904.
9. Гадолин А. В. Вывод всех кристаллографических систем и их подразделений из одного общего начала (1867). Изд. АН СССР, 1954, стр. 58—61.
10. Наumann K. Ф. Основы минералогии, СПб., 1860.
11. Кошаров Н. И. Лекции минералогии, СПб., 1863.
12. Федоров Е. С. Краткое руководство по кристаллографии. СПб., 1891.
13. Федоров Е. С. Курс кристаллографии, СПб., 1897.
14. Федоров Е. С. Курс кристаллографии, СПб., 1901.

Э. П. САЛЬДАУ

ОПЫТЫ ПО ОКИСЛЕНИЮ МАГНЕТИТА В МАГГЕМИТ

В настоящем сообщении приведены результаты опытов, проделанных с целью перевода магнетита $\text{Fe}''\text{Fe}_2''\text{O}_4$ в маггемит $\gamma-\text{Fe}_2\text{O}_3$ и выяснения изменения элементарной ячейки магнетита в зависимости от степени окисления двухвалентного железа. Как известно, магнетит имеет структуру шпинели, где атомы кислорода образуют плотнейшую кубическую упаковку, атомы Fe'' занимают октаэдрические пустоты, а атомы Fe''' — тетраэдрические. При медленном окислении идет превращение магнетита в маггемит $\gamma-\text{Fe}_2\text{O}_3$. Структура шпинели при этом сохраняется, но размеры элементарной ячейки заметно уменьшаются. Нагреванием магнетита удалось получить препараты с $a_0 = 8,362 \text{ к}\text{\AA}$, тогда как у исходного материала $a_0 = 8,392 \text{ к}\text{\AA}$.

Процесс перехода магнетита в маггемит может быть представлен схематически



Уменьшение ребра элементарной ячейки вызвано заменой Fe'' с ионным радиусом 0,79 на Fe'''' с ионным радиусом 0,67 Å. Величина же ребра элементарной ячейки является функцией радиусов катионов [2].

Для опыта был взят магнетит с месторождения Питкяранта.

Препараты для рентгеновского анализа готовились следующим образом: а) магнетит мелко истирался в агатовой ступке; б) истертый порошок прокаливался в круглой печи с доступом воздуха при 100, 200, 300° последовательно 1, 2, 3, 4 час. при каждой из указанных температур; в) часть препаратов приготавлялась путем прокаливания на электрической плитке, при 300° в течение 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4 час. Температура измерялась термопарой.

Все препараты исследовались рентгенометрическим методом Дебая, единственным применимым в данном случае. Источником

рентгеновских лучей служила ионная трубка Хаддинга, с Fe — анткатодом при напряжении 35—40 кв, 8 ма. Съемка проводилась в камерах диаметром 68 мм. Столбик исследуемого вещества прессовался в стеклянном капилляре с внутренним диаметром 0,8 мм, затем выдавливался и укреплялся воском в центре камеры. Рентгенограммы измерялись полумиллиметровой линейкой. Относительные интенсивности линий оценивались на глаз по десятибалльной шкале, причем самой интенсивной линии приписывался балл 10, а самой слабой — 1. Для учета погрешностей за счет толщины столбика, эксцентрикитета образца, эллипсоидальности камеры, неплотного прилегания пленки и ее стягивания при проявлении и просушивании рентгенограммы снимались с образцов с примесью каменной соли (от 20 до 30% по объему). Поправки вводились по методу, подробно описанному в работе А. К. Болдырева, В. И. Михеева, Г. А. Ковалева, В. Н. Дубининой, [1].

В таблицах межплоскостных расстояний, полученных для исходного материала и прокаленных образцов (табл. 1—4), даны значения $\frac{d_a}{n}$ и $\frac{d_3}{n}$, вычисленные для каждой линии в предположении K_α и K_β — излучения. Длина волны этих излучений железного анткатода принималась следующая $\lambda_\alpha = 1,934 \text{ \AA}$, $\lambda_\beta = 1,753 \text{ \AA}$. Полученные дебаеграммы индицировались по известной для кубической сингонии формуле

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a_0^2},$$

где d — величина межплоскостного расстояния;

a_0 — величина ребра элементарной ячейки;

h, k, l — индексы плоской сетки.

Каждая рентгенограмма предварительно индицировалась при известном значении $a_0 = 8,396 \text{ \AA}$, взятом из литературных данных. Для наиболее интенсивных линий, получивших определенные однозначные индексы символа, вычислялись размеры элементарной ячейки образца.

Окончательное значение величины ребра элементарной ячейки определялось как среднее арифметическое из отдельных значений результатов.

В табл. 1, 2, 3 приведены значения межплоскостных расстояний для исходного материала и магнетита, прокаленного в круглой печи при 300° в течение 1—2 час.

Сравнение результатов показывает заметное уменьшение размеров элементарной ячейки.

Таблица 1

номер линии п/п.	I	hkl	Магнетит (исходный материал)		
			$\frac{d_a}{n}$	$\frac{d_3}{n}$	$a_0 \cdot kX$
1	1	220 β	(3,276)	2,970	
2	7	220	2,965	2,688	8,390
3	5	311 β	(2,789)	2,528	
4	10	311	2,532	2,295	8,394
5	2	222	2,425	2,198	8,403
6	3	400 β	(2,314)	2,097	
7	8	400		1,900	8,388
8	1	422 β	(1,888)	1,712	
9	4	333 β , 511 β	(1,780)	1,614	
10	6	422	1,713	1,553	8,394
11	3	440 β	(1,635)	1,482	
12	9	333, 511	1,616	1,464	8,400
13	10	440	1,493	1,345	8,386
14	1	533 β	(1,411)	1,279	
15	4	620	1,327	1,202	8,393
16	6	533	1,279	1,159	8,390
17	3	622	1,265	1,147	8,387
18	2	642 β	(1,214)	1,100	
19	2	731 β , 553 β	(1,205)	1,092	
20	1	800 β	(1,158)	1,049	
21	7	642	1,122	1,017	8,391
22	10	731, 553	1,093	0,990	8,394
23	5	800	1,049	0,951	8,392

$$a_{cp} = 8,392$$

Таблица 2

номер линии п/п.	I	hkl	Магнетит, прокаленный при 300° в течение 1 часа (печь)		
			$\frac{d_a}{n}$	$\frac{d_3}{n}$	$a_0 \cdot kX$
1	2	220 β	(3,261)	2,956	
2	7	220	2,958	2,681	8,371
3	5	311 β	2,783	2,522	
4	10	311	2,521	2,286	8,357
5	3	222	2,420	2,194	8,385
6	3	400 β	(2,308)	2,092	
7	6	400	2,092	1,896	8,368
8	1	422 β	(1,892)	1,715	
9	4	333 β , 511 β	(1,779)	1,612	

Продолжение табл. 2

Магнетит, про агенный при 300° в течение 1 часа (печь)

номер линии п/п.	<i>I</i>	<i>hkl</i>	$\frac{d_2}{n}$	$\frac{d_3}{n}$	a_0, kX
10	6	422	1,710	1,549	8,379
11	2	440 3	(1,628)	(1,476)	
12	9	333, 511	1,612	1,462	8,379
13	10	440	1,480	1,342	8,374
14	1	533 3	(1,413)	1,280	
15	4	620	1,325	1,201	8,381
16	6	533	1,278	1,158	8,324
17	3	622	1,263	1,145	8,374
18	3	642 β	(1,210)	1,097	
19	2	731 β, 553 β	(1,203)	1,090	
20	1	800 β	(1,155)	1,047	
21	7	642	1,120	1,016	8,377
22	9	731, 553	1,091	0,989	8,378
23	6ш	800	1,047	0,918	8,376

$$a_{cp} = 8,375$$

Таблица 3*

Магнетит, прокаленный при 300° в течение 2 час. (печь)

номер линии п/п.	<i>I</i>	<i>hkl</i>	$\frac{d_2}{n}$	$\frac{d_3}{n}$	a_0, kX
1	6	220	2,958	2,681	8,371
2	10	311	2,518	2,282	8,347
3	3	222	2,414	2,188	8,364
4	8	400	2,090	1,894	8,360
5	6	422	1,708	1,548	8,369
6	9	333, 511	1,609	1,458	8,334
7	10	440	1,480	1,341	8,374
8	4	620	1,323	1,199	8,368
9	5	533	1,278	1,158	8,384
10	3	622	1,263	1,145	8,374
11	7	642	1,120	1,015	8,377
12	9	731, 553	1,091	0,989	8,378
13	5ш	800	1,047	0,948	8,376

$$a_{cp} = 8,370$$

* Приведены только наиболее интенсивные линии, по которым вычисляются размер элементарной ячейки.

Размеры элементарной ячейки, полученные для магнетита, прокаленного при разных температурах и в течение различного времени, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Название материала	Температура °C	Время час.	a_0, kX	Название материала	Температура °C	Время час	a_0, kX
Магнетит (печь)	0	0	8,392	Магнетит (электрическая плитка)	300	1/4	8,386
	200	1	8,384		300	1/2	8,375
	200	2	8,382		300	1	8,370
	200	3	8,381		300	2	8,365
	200	5	8,381		300	3	8,363
	300	1	8,375		300	4	8,362
	300	2	8,370		300	5	8,362
	300	4	8,366		300	6	8,362

Как видно из диаграммы рис. 1, с повышением температуры и при большем допуске воздуха процесс окисления значительно ускоряется, что ведет к уменьшению размеров элементарной ячейки и появлению гематита.

Кривая при 200° начинает выполаживаться уже при $a = 8,381 kX$. При дальнейшем нагревании при этой температуре появляются линии гематита, что связано с выносом $\frac{1}{3}$ общего количества Fe'', которое при окислении дает Fe_2O_3 , а $\frac{2}{3}$ Fe'' замещаются Fe''. Общая же структура магнетита сохраняется.

При 300° процесс окисления идет значительно быстрее. Это выражается в резком уменьшении параметра a . Выполаживание кривой наблюдается лишь с $a = 8,366 kX$. Линии гематита появляются после 4 час. прокаливания. Еще быстрее этот процесс проходит при более свободном доступе воздуха (нагревание на электрической плитке). В этом случае кривая начинает выполаживаться при $a = 8,362 kX$. Линии же гематита наблюдаются уже после 15 мин. прокаливания, и дальше их интенсивность возрастает.

Таким образом, с повышением температуры и изменением окислительной обстановки процесс превращения магнетита в магнетит ведет, с одной стороны, к уменьшению параметра решетки, а с другой — к возрастанию количества гематита.

Образование гематита сказывается в появлении вторых линий двух характерных для гематита дублетов с межплоскостными расстояниями $\frac{d}{n} = 2,690$ и 1,451 в области средних углов.

При каждой из вышеуказанных температур параметр ребра элементарной ячейки изменяется только до определенного значе-

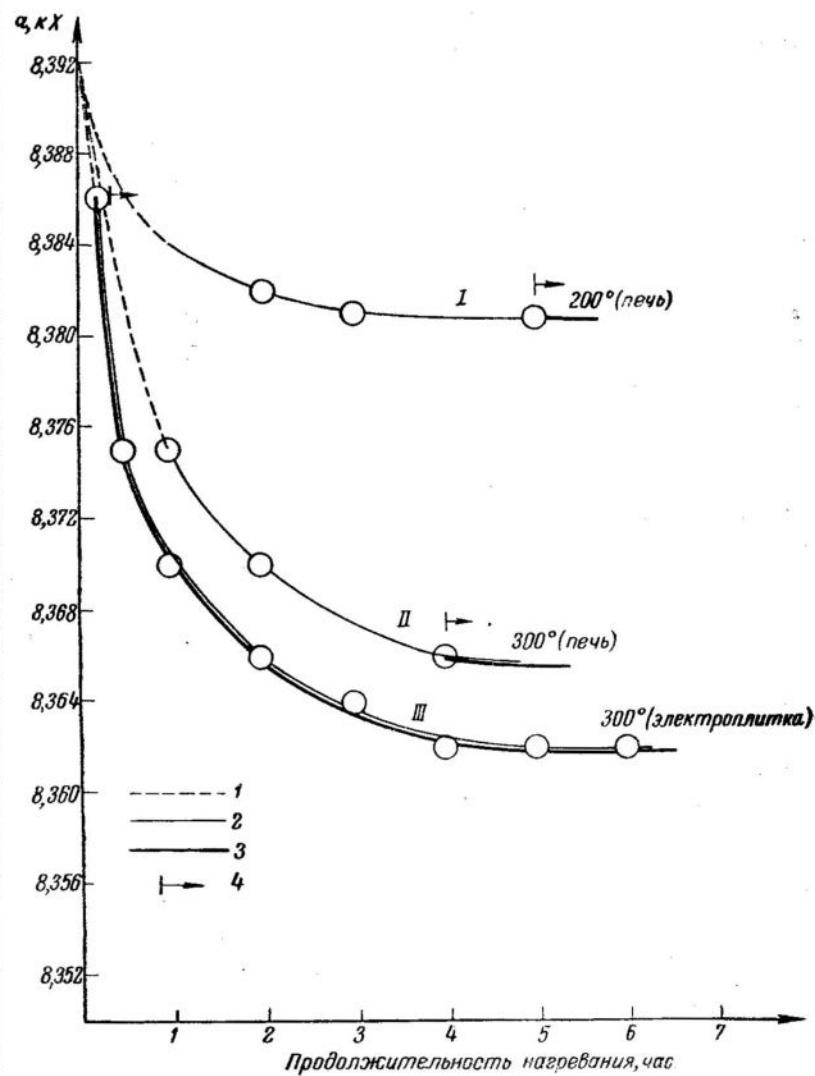


Рис. 1. Зависимость величины ребра ячейки a_0 , от продолжительности нагревания при 200 и 300°:

1 — магнетит; 2 — маггемит; 3 — гематит; 4 — граница появления гематита

ния a_{\min} , а затем увеличивается лишь число и интенсивность линий гематита. Это, повидимому, связано с прекращением процесса замещения Fe'' на Fe''' (происходит лишь процесс превращения магнетита в гематит с разрушением первоначальной структуры).

Как видно из диаграммы (рис. 1), характер процесса перехода FeFe_2O_3 в $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ различен при разных температурах. Если кривая I, выражающая процесс превращения при 200°, сравнительно пологая и очень быстро переходит в прямую, то, напротив, кривая

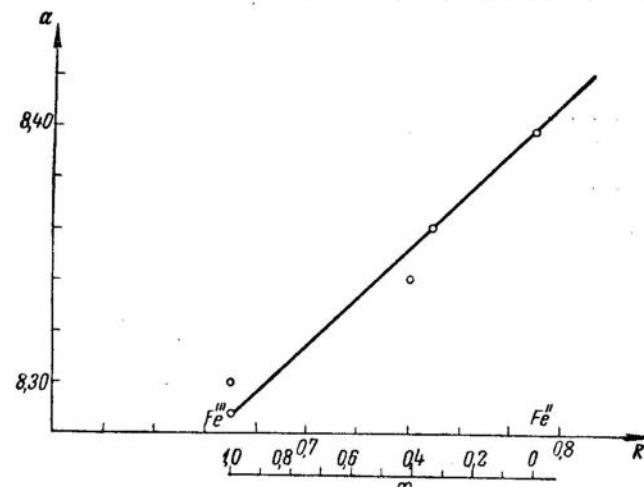


Рис. 2. Зависимость величины ребра ячейки шпинелидов от состава

II резко падает вниз. Это еще отчетливее наблюдается на кривой III, показывающей процесс превращения магнетита в маггемит в более окислительной обстановке.

Характер кривой определяется в первую очередь изменением параметра решетки, а следовательно, находится в зависимости от количества Fe'' , замещенного на Fe''' , т. е. при каждой из указанных температур это замещение доходит до определенного предела. Большое влияние на процесс оказывает также обстановка опыта.

Так, Г. Хагг осуществил полный переход магнетита в маггемит без нарушения структуры шпинели при нагревании магнетита в струе кислорода при 300° в течение 1 часа [5]. Ему удалось получить значение ребра элементарной ячейки $a = 8.322 \text{ кХ}$.

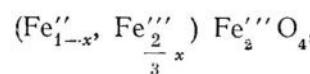
При наших условиях опытов возможным оказалось получить лишь $a = 8.362 \text{ кХ}$.

Зная значение параметра a_0 для любой точки каждой из полученных трех кривых (рис. 1), можно, пользуясь известной диаграммой рис. 2 [2], определить значение x в общей формуле магнетита

$(\text{Fe}_{1-x}^{\prime\prime}, \text{Fe}_{\frac{2}{3}x}^{\prime\prime\prime}) \text{Fe}_2^{\prime\prime\prime}\text{O}_4$, а следовательно, установить предельное содержание двухвалентного железа ($1 - x$), при котором для данной температуры еще сохраняется структура шпинели. Очевидно, для получения такого предельного содержания $\text{Fe}^{\prime\prime}$, следует определять значение x для моментов выполнения кривых (табл. 5).

Таблица 5

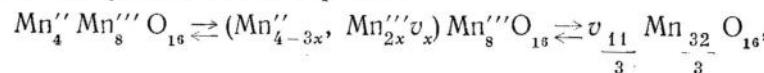
Температура град.	a_0	x	$1-x$
200 (печь)	8,381	0,18	0,82
300 (печь)	8,366	0,30	0,70
300 (электрическая плита)	8,362	0,35	0,65



где x изменяется в области от 0 до 1.

При $x = 0$ получаем FeFe_2O_4 . При $x = 1$ приходим к формуле $\text{Fe}_{\frac{8}{3}}^{\prime\prime\prime}\text{O}_4$, т. е. к полуторному окислу со структурой шпинели $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Подобная серия переходов может быть получена для гаусманнита и, возможно, для целого ряда других минералов [5], особенно зоны окисления. Для гаусманнита, например предположительного дается следующая схема перехода



где v — свободные места.

2. Установлено, что процесс превращения магнетита в магнетит $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ при различных температурах идет по двум направлениям:

а) по линии уменьшения ребра элементарной ячейки магнетита и

б) по линии выноса $\frac{1}{3} \text{Fe}^{\prime\prime}$ и образования при его окислении гематита, количество которого при дальнейшем нагревании растет.

3. Скорость процесса превращения $\text{Fe}^{\prime\prime}\text{Fe}^{\prime\prime\prime}_2\text{O}_4$ в $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ увеличивается с повышением температуры и изменением условий опыта (см. рис. 1).

4. Для каждой из указанных температур нагревания установлено $a_{\text{опт}}$, указывающее, что процесс замещения $\text{Fe}^{\prime\prime}$ на $\text{Fe}^{\prime\prime\prime}$ при данной температуре и данных условиях опыта идет лишь до опре-

деленного предела, за которым нарушается структура магнетита, и он переходит в гематит.

Процесс окисления магнетита при нагревании исследовали Е. Р. Шмидт и Ф. Вермас [6] с помощью дифференциального термического анализа. Они установили на кривой два экзотермических пика, объясняя их двумя реакциями окисления магнетита при нагревании. Первую реакцию они определили как окисление $\text{Fe}^{\prime\prime}$ на поверхности частиц магнетита. Вторую — сочли за окисление магнетита в процессе диффузии кислорода в структуру магнетита.

Таким образом, проделанные опыты могут быть использованы для понимания некоторых процессов минералообразования, происходящих в зоне окисления рудных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

- Болдырев А. К., Михеев В. И., Ковалев Г. А., Дубинина В. Н. Рентгеновский определитель минералов, ч. 1. Записки Ленинградского горного института, 1938, т. XI, вып. 2.
- Михеев В. И. Формула для вычисления ребра ячейки шпинели. ДАН СССР, 1955, т. 4.
- Михеев В. И., Стулов Н. Н. О продуктах высокотемпературного нагревания слоистых силикатов. Записки Всесоюзного минералогического о-ва, 1955, вып. 1.
- Fronde C. Am. Min., 1953, № 38, p. 671—679.
- Hägg G. Zeit. Physik. chemie., 1935, B. 29.
- Schmidt E. R., Vermaas F. H. S. Am. Min., 1955, № 40, p. 422—31.

Г. А. КОВАЛЕВ

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕЛЕЗО-МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ХЛОРИТОВ

ВВЕДЕНИЕ

Распознавание минеральных видов хлоритов одним рентгеновским методом некоторые исследователи считают ненадежным. Они объясняют это тем, что хлориты имеют одинаковую кристаллическую структуру и поэтому дают сходные рентгенограммы, отличающиеся лишь незначительными деталями. Указывается, кроме того, что многие представленные в литературе рентгеновские данные были определены недостаточно точно [2, 4].

Ненадежность определения хлоритовых минералов рентгеновским методом порошка, на основе опубликованных данных, усугубляется еще и тем, что полученные рентгеновские данные связываются с различными наименованиями хлоритов, но при этом не указываются признаки различия между хлоритами различного состава. В результате один и тот же хлорит, определяемый на основании литературных рентгеновских данных, вследствие сходства дифрактограмм, может получить несколько наименований, а так как различные наименования присваивались хлоритам, отличающимся по составу, то, следовательно, одному и тому же хлориту будет приписываться различный состав. Чтобы рентгеновское определение хлоритов стало надежным, необходимо не только повысить точность рентгеновских данных, на что справедливо указали Бриндли, Робинсон и В. И. Михеев [2, 4], но и выявить надежные структурные признаки различия между хлоритами различного состава.

Последнее, по нашему мнению, заслуживает не меньшего внимания, чем повышение точности рентгеновских данных, так как, не зная достоверных признаков различия между хлоритами различного состава, нельзя распознавать их даже при помощи точных рентгеновских данных.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе приводятся результаты исследования 16 железо-магнезиальных хлоритов различного состава, представленного в табл. I, где, кроме того, даны пересчеты на кристаллохими-

Химические анализы, пересчеты
и показатели светопреломления

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	33,87	33,25	32,95	31,68	29,46	29,56	27,23
TiO ₂	—	Следы	—	—	0,08	0,08	0,15
Al ₂ O ₃	12,78	13,06	10,71	17,16	19,30	19,68	22,16
Fe ₂ O ₃	2,36	3,34	1,84	2,05	2,19	2,05	1,84
Cr ₂ O ₃	—	—	2,38	—	—	0,37	—
FeO	1,30	5,57	1,56	1,57	1,92	3,33	8,02
MnO	0,14	0,20	—	—	—	0,09	0,31
CaO	—	0,17	0,64	0,20	0,03	0,44	—
K ₂ O	—	—	—	—	—	—	—
Na ₂ O	—	—	—	—	—	—	—
MgO	35,67	32,65	36,16	33,60	32,96	31,92	27,81
H ₂ O	13,78	12,33	13,50	13,40	13,85	12,38	12,72
H ₂ O	—	0,09	0,72	0,63	0,99	—	—
Сумма	99,80	100,66	100,46	100,78	100,78	99,90	100,24
Si	3,22	3,16	3,15	3,01	2,82	2,81	2,64
Al	0,78	0,84	0,85	0,99	1,18	1,19	1,36
Al	0,65	0,62	0,36	0,92	0,99	0,99	1,17
Ti	—	—	—	—	0,01	0,02	0,01
Fe ⁺⁺	0,17	0,25	0,14	0,14	0,16	0,15	0,13
Fe ⁺⁺	0,10	0,45	0,13	0,13	0,16	0,26	0,65
Ca	—	0,02	0,06	0,02	0,01	0,03	—
Cr	—	—	0,17	—	—	0,02	—
Mn	0,01	0,02	—	—	—	0,01	0,02
Mg	5,04	4,05	5,10	4,75	4,69	4,50	4,02
Y	5,97	5,41	5,96	5,96	6,02	5,98	6,00
OH	8,00	7,82	8,00	8,00	8,00	7,88	8,00
O	10,00	10,09	10,00	10,00	10,00	10,06	10,00
H ₂ O	0,36	—	0,31	0,24	0,42	—	0,10
N _m	1,576	1,576	1,580	1,586	1,589	1,595	1,596
Удельный вес	—	2,77	—	—	2,69	—	—

на кристаллохимическую формулу
ения исследованных хлоритов

8	9	10	11	12	13	14	15	16
26,77 0,20	25,56 0,01	25,41 0,22	26,76 0,14	26,20 —	25,28 1,21	24,96 0,08	25,22 0,10	21,66 0,19
24,95 2,70	21,46 4,68	28,50 5,21	19,72 1,26	22,61 3,42	22,74 7,82	20,60 4,86	21,60 3,71	18,56 9,05
10,23 0,09 0,13	12,80 0,03	11,91 0,04	16,34 0,32	20,08 0,60	22,13 0,34	24,29 0,54	24,52 0,46	36,94 0,08
— —	— —	— —	— —	— —	— —	— 0,76	— —	— —
23,44 11,64 0,80	22,00 12,33 1,60	15,70 12,21 —	22,61 12,34 0,04	15,40 11,79 —	10,30 10,46 —	13,12 11,12 —	14,09 10,17 0,10	2,16 10,62 0,92
100,95 2,59 1,41	100,59 2,60 1,40	99,92 2,52 1,48	99,79 2,71 1,29	100,10 2,69 1,31	100,28 2,60 1,40	100,33 2,64 1,36	100,52 2,60 1,40	100,18 2,51 1,49
1,44 0,02	1,16 —	1,84 0,02	1,00 0,01	1,42 —	1,36 0,09	1,20 0,01	1,23 0,01	1,04 0,01
0,20 0,83 0,01	0,28 1,09 0,01	0,38 0,98 0,07	0,10 0,39 0,04	0,26 1,72 —	0,61 1,90 —	0,38 2,10 —	0,30 2,11 —	0,79 3,57 —
— 0,01 0,01	— 0,01 3,38	— 0,01 3,35	— 0,03 2,31	— 0,55 3,42	— 0,03 2,35	— 0,03 1,60	— 0,03 2,10	— 0,04 2,16
5,89	5,84	5,61	5,99	6,30	5,59	5,87	5,91	5,79
7,51 10,26 —	8,00 10,00 0,18	8,00 10,00 0,04	8,00 10,00 0,19	8,00 10,00 0,10	7,20 10,40 —	7,84 10,08 —	7,01 10,50 —	8,00 10,00 0,10
1,601	1,609	1,610	1,608	1,623	1,626	1,628	1,640	1,648
2,78	2,95	2,92	—	—	—	—	2,92	—

ческую формулу и показатели светопреломления (определенены по Е. П. Соколовой).

Пересчет на кристаллохимическую формулу произведен по способу, описанному у Д. П. Сердюченко [3], т. е. из 14 кислородов (на безводное вещество).

Хлориты № 1, 4, 7, 11, 12, 13, 14 и 16 получены от В. П. Ивановой [1]. Они изучались ею в 1949 г. термически, химически и оптически. Остальные хлориты, полученные из различных музеев и коллекций исследователей, после тщательного отбора были проанализированы в химической лаборатории ВСЕГЕИ.

Как показали дифрактограммы, все исследованные хлориты дают сходные дифракционные картины. Для шести хлоритов, наиболее заметно отличающихся друг от друга по составу, были найдены межплоскостные расстояния и относительные интенсивности дифракционных линий (табл. 2). Между этими хлоритами наблюдается большое структурное сходство, но обнаруженные отклонения в величинах межплоскостных расстояний, относительных интенсивностей и числе дифракционных линий не позволяют считать дифрактограммы представленных хлоритов тождественными. Однако наблюдающиеся отклонения не очень выразительны, поэтому простым сравнением найденных величин межплоскостных расстояний и относительных интенсивностей дифракционных линий трудно определить, какое из них можно использовать в качестве достоверного признака различия между хлоритами.

Некоторыми исследователями [4, 5] установлено, что в связи с двумя главными типами изоморфного замещения происходит заместное изменение величины двух параметров элементарной ячейки хлоритов. Замещение кремния в тетраэдрических слоях ионами алюминия приводит к уменьшению параметра c , а замещение в октаэдрических слоях магния двухвалентным железом — к увеличению параметра b . Правда, указанное соотношение между параметрами элементарной ячейки и составом хлоритов иллюстрируется в литературе недостаточно отчетливо. Так, например, Бриндли и Робинсон приводят таблицу зависимости базальных расстояний от изменения отношения кремнезема к алюминию (табл. 3), из которой следует, что закономерность изменения базального расстояния в зависимости от отношения кремния к алюминию имеет место только для первых трех хлоритов. Это обстоятельство, повидимому, и привело авторов к выводу о неточности литературных рентгеновских данных.

Так как среди исследованных нами железо-магнезиальных хлоритов имеются почти чисто магнезиальный и почти чисто железистый представители ряда, между которыми находятся хлориты с различным количеством двухвалентного железа и магния, то важно было проследить соотношение между параметрами элементарной ячейки и составом исследованных нами хлоритов.

Таблица 2

Межплоскостные расстояния (κX) и относительные интенсивности дифракционных линий на рентгенограммах порошка хлоритов

Fe — анод; $D = 89,95 \text{ мм}$; $d = 0,5 \text{ мм}$; около 40 кв ; 14 mA ; 9 час. (без фильтра). Исправления по снимку с NaCl

hkl^{**}	Номер химического анализа в табл. 1											
	1		4		7		12		15		16	
	d	I	d	I	d	I	d	I	d	I	d	I
001	14,4	8	14,2	6	14,2	7	14,1	5	14,1	5	14,1	5
002	7,2	10	7,1	10	7,1	10	7,1	10	7,1	10	7,1	10
003 ₃	5,2	3	5,2	3	5,2	4	5,2	3	5,2	3	5,2	3
003	4,78	10	4,74	10	4,72	10	4,72	7	4,71	7	4,70	6
004 ₃	3,95	3	3,92	4	3,93	5	3,91	3	3,92	2	3,91	4
004	3,59	10	3,55	10	3,54	10	3,53	9	3,53	10	3,53	9
005 ₃	3,17	1	3,13	1	3,12	1	3,11	1	3,11	1	3,11	1
005	2,87	8	2,84	7	2,83	7	2,82	6	3,82	6	2,82	5
132, 203 ₃	2,71	1	2,70	2	2,69	1	2,69	1	2,68	1	2,67	1
131, 202	2,59	2	2,59	2	2,59	3	2,59	4	2,61	4	2,62	7
131, 201	2,55	7	2,54	6	2,55	5	2,56	4	2,56	4	2,57	4
132, 203	2,45	7	2,44	5	2,44	5	2,45	4	2,46	4	2,47	5
133, 202	2,39	4	2,38	3	2,39	3	2,39	3	2,39	4	2,41	7
133, 204	2,27	4	2,26	3	2,26	3	2,26	2	2,27	4	2,28	6
135, 204 ₃	2,23	2	2,22	2	2,22	2	2,22	2	2,21	1	2,23	22
007	2,06	1	2,06	1	2,07	2	2,08	1	2,07	2	2,07	1
135, 204	2,02	9	2,01	9	2,01	8	2,01	9	2,01	8	2,02	8
135, 206	1,89	5	1,88	3	1,88	4	1,88	5	1,89	4	1,89	6
136, 205	1,84	5	1,83	3	1,83	4	1,83	4	1,83	2	1,83	2
137, 208 ₃	1,74	2	1,74	1	1,73	1	—	—	—	—	—	—
060, 331 ₃	1,70	2	1,69	2	1,70	2	—	1,71	2*	1,72	3*	1,72
331	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
137, 206	1,67	1	1,66	2	1,66	3	1,66	3	1,66	3	1,67	3
137, 208	1,576	7	1,567	6	1,564	7	1,563	7	1,562	8	—	—
060, 331,	1,536	8	1,536	8	1,540	8	1,543	7	1,551	7	1,559	8*
331	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
062, 331	1,504	4	1,503	3	1,505	3	1,509	3	1,515	4	1,523	6
4003	1,466	1	1,458	1	1,460	1	1,464	1	1,472	1	1,479	1
0010	1,436	2	1,422	2	1,415	2	1,415	3	1,413	2	1,410	2
139, 208	1,406	8	1,393	7	1,394	7	1,390	7	1,392	7	1,394	6
1,357	1	1,352	1	1,356	1	1,350	1	1,348	1	1,356	1	
400	1,319	4	1,318	4	1,323	3*	1,327	3	1,332	3	1,338	5
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,322	1
1,295	5*	1,289	3	1,294	2	1,297	2	1,300	2	1,301	3	
—	—	—	—	1,283	1	1,279	1	1,284	1	1,285	1	

Продолжение табл. 2

<i>hkl**</i>	Номер химического анализа в табл. 1											
	1		4		7		12		15		16	
<i>d</i> <i>n</i>	<i>I</i>	<i>d</i> <i>n</i>	<i>I</i>	<i>d</i> <i>n</i>	<i>I</i>	<i>d</i> <i>n</i>	<i>I</i>	<i>d</i> <i>n</i>	<i>I</i>	<i>d</i> <i>n</i>	<i>I</i>	
1,231	4	1,219	4	1,220	4	1,224	3*	1,227	2	1,228	2	
—	—	—	—	—	—	—	—	1,214	1	1,218	1	
1,197	4	1,186	2	1,192	1	1,193	2	1,197	2	1,196	3	
1,179	1	—	—	1,179	2	1,178	3	1,177	3	1,176	3	
1,145	2	—	—	1,148	1	1,150	1	1,149	1	1,151	1	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,140	1	
1,131	1	1,131	3	1,132	4	1,132	6	1,132	5	1,132	3	
1,101	5	1,097	3*	1,095	3*	1,098	3	1,102	3	1,104	4	
1,049	5	1,045	4	1,043	4	1,043	5	1,047	4	1,048	6	
1,038	4	1,034	4	1,032	3	1,035	2	1,036	1	1,037	1	
1,027	2	1,020	2	1,029	1	1,022	1	1,028	1	1,033	1	
1,003	4	1,001	4	1,00	3	1,001	4	1,011	5	1,016	6	

* Широкая линия. ** *hkl* заимствованы из работы Бриндли и Робинсона [4] и проверены нами.

Таблица 3

Базальные расстояния хлоритов в зависимости от $\text{Si}/\text{Al}_{\text{IV}}$
(по данным Бриндли и Робинсона [4])

Хлорит	$\text{Si}/\text{Al}_{\text{IV}}$	Базальное расстояние, <i>kX</i>			
		по Баннистру и Виттарду	по Мак Мерчи	по Энгельгарду	по Бриндли и Али
Диабантит	6,08	14,34	—	—	—
Пенинн	4,05	14,30	—	—	14,34
Клинохлор	3,07	14,17	—	—	14,15
Шамозит	2,71	14,12	—	—	—
Лейхтенбергит	2,63	—	14,13	—	—
Магниевый шамозит	2,56	14,12	—	—	—
Хлорит	2,20	—	14,03	—	—
Дафнит	2,14	14,10	—	—	—
Тюрингит	2,07	—	—	13,94	—
Шериданит	1,87	—	14,12	—	14,08
Хлориг	1,75	—	14,09	—	—
Тюрингит	1,64	14,00	—	—	—
Прохлорит	1,58	—	14,06	—	—
Тюрингит	1,49	—	—	13,98	—
Корунофиллит	1,39	14,00	—	—	—
Бавалит	1,28	—	—	13,98	—

В табл. 4 и 5 приведены: количество кремния, алюминия четверной координации, двухвалентного железа, магния, отношения Si/Al и Fe^{++}/Mg и параметры элементарной ячейки $c \sin \beta$ и b . Параметр $c \sin \beta$ определялся по высоким порядкам (001).

Таблица 4

Зависимость параметра $c \sin \beta$ от замещения кремния алюминием

Номер хлорита	Si	Al_{IV}	$\text{Si}/\text{Al}_{\text{IV}}$	$c \sin \beta$	Номер соответствующего валового анализа в табл. 1
1	3,22	0,78	4,13	14,36	1
2	3,16	0,84	3,76	14,29	2
3	3,15	0,85	3,71	14,29	3
4	3,01	0,99	3,04	14,23	4
5	2,82	1,18	2,39	14,19	5
6	2,81	1,19	2,36	14,18	6
7	2,71	1,29	2,10	14,16	11
8	2,69	1,31	2,05	14,15	12
9	2,64	1,36	1,94	14,15	7
10	2,64	1,36	1,94	14,15	14
11	2,60	1,40	1,86	14,14	9
12	2,60	1,40	1,86	14,14	13
13	2,60	1,40	1,86	14,13	15
14	2,59	1,41	1,79	14,13	8
15	2,52	1,48	1,72	14,12	10
16	2,51	1,49	1,69	14,10	16

Таблица 5

Зависимость параметра b от замещения магния двухвалентным железом

Номер хлорита	Fe^{++}	Mg	Fe^{++}/Mg	b	Номер соответствующего валового анализа в табл. 1
1	0,10	5,04	0,02	9,22	1
2	0,13	5,10	0,03	9,22	3
3	0,13	4,75	0,03	9,22	4
4	0,16	4,69	0,03	9,22	5
5	0,26	4,50	0,06	9,23	6
6	0,39	3,42	0,12	9,23	11
7	0,45	4,05	0,10	9,24	2
8	0,65	4,02	0,16	9,24	7
9	0,83	3,38	0,25	9,25	8
10	0,98	2,31	0,42	9,24	10
11	1,09	3,35	0,33	9,24	9
12	1,72	2,35	0,73	9,26	12
13	1,90	1,60	1,19	9,29	13
14	2,10	2,10	1,00	9,30	14
15	2,11	2,16	0,98	9,31	15
16	3,57	0,37	9,65	9,35	16

Расположение хлоритов в табл. 4 соответствует порядку возрастания в их составе количества алюминия четверной координации, в табл. 5 — количества двухвалентного железа. Как видно из таблиц, с возрастанием количества алюминия, замещающего кремний, параметр $c \sin \beta$ закономерно уменьшается, параметр же b при возрастании количества двухвалентного железа, замещающего магний, увеличивается, при этом оба параметра изменяются постепенно. Материал, представленный в табл. 4 и 5, позволяет сделать ряд выводов.

Постепенное изменение параметров указывает на то, что железо-магнезиальные хлориты нельзя делить на обособленные группы (например, орто- и лептохлориты), а их правильнее рассматривать как единое семейство, в котором имеет место сравнительно постепенный переход от магнезиального члена к железистому — образование как бы непрерывного изоморфного ряда. Непрерывность ряда иногда может нарушаться вследствие действия других типов изоморфного замещения, наблюдавшихся в хлоритах. В семействе железо-магнезиальных хлоритов не может быть минеральных видов с ярко выраженным индивидуальными особенностями, поэтому расчленение этого изоморфного ряда может быть произведено только условно. При этом количество минеральных видов зависит от того, какая величина изменения классификационного признака, положенного в основу систематики, будет принята в качестве критерия для выделения минеральных видов.

Так как каждый метод исследования имеет свою специфику, то классификации хлоритов, основанные на различных методах, могут различаться в значительной степени. Из табл. 4, например, видно, что расчленение железо-магнезиальных хлоритов на отдельные минеральные виды на основе кристаллохимических и рентгеновских данных будет различным.

Удовлетворительное и обоснованное расчленение хлоритов может быть сделано, с нашей точки зрения, только на основе согласованных данных химического, оптического, термического и рентгеновского методов исследований. Такая единая классификация устранит ныне существующую громоздкую и достаточно запутанную номенклатуру и затруднения, возникающие при диагностике хлоритов.

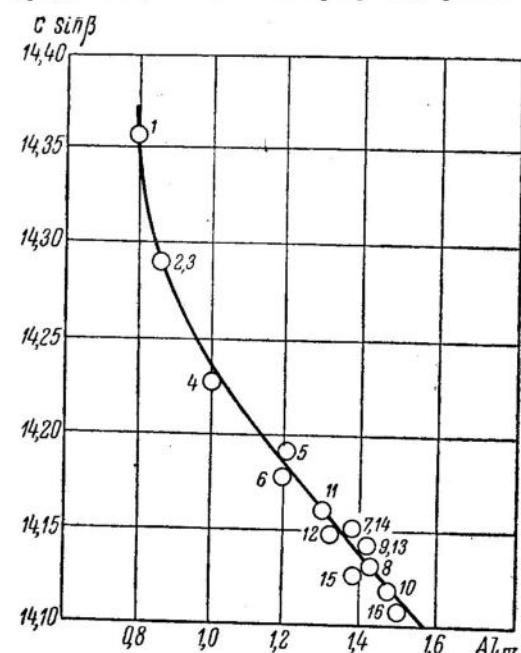
Наиболее выразительными признаками различия между хлоритами являются параметры b и $c \sin \beta$. Они могут быть использованы не только для диагностики, но и для определения состава хлоритов.

Число исследованных нами хлоритов с ограниченным составом, конечно, недостаточно для того, чтобы получить полное представление о составе неизвестного хлорита по его параметрам. Но отнести хлорит к магнезиальному, железистому или магнезиально-железистому и даже дать его приближенную кристаллохимиче-

скую формулу вполне возможно. Так как иногда ввиду малого количества вещества невозможно произвести химический анализ хлорита, то мы на рис. 1 приводим график, с помощью которого можно получить представление о составе хлорита, минуя химический анализ.

Дальнейшее накопление данных о хлоритах различного состава позволит уточнить представленный нами график и расширить его возможности.

График рис. 2, показывающий зависимость между количеством алюминия, замещающего кремний, и параметром $c \sin \beta$ позволяет по параметру $c \sin \beta$, найденному по дебаеграммам, определить в составе хлорита количество алюминия четверной координации, а следовательно, и количество кремния. Аналогичным образом по данным табл. 5 можно построить график зависимости между количеством железа, замещающего магний, и параметром b .



ВЫВОДЫ

В настоящей работе показано изменение параметров b и $c \sin \beta$ в связи с изменением состава для 16 хлоритов.

Как свидетельствует рентгеновское исследование, железо-магнезиальные хлориты правильнее рассматривать как одно семейство, не разделяя на две обособленные группы — орто- и лептохлориты.

В семействе железо-магнезиальных хлоритов не существует минералов с ярко выраженным индивидуальными особенностями, поэтому расчленение их на отдельные минеральные виды можно произвести только условно. Для устранения трудностей при диагностике необходимо создать единую классификацию хлоритов с обоснованной номенклатурой, для чего расчленение хлоритов следует произвести на основе данных не одного, а всех главнейших

методов исследования так, чтобы каждый условно выделенный минеральный вид хлорита получил наименование, согласованное между химическим, оптическим, термическим и рентгеновским методами исследований.

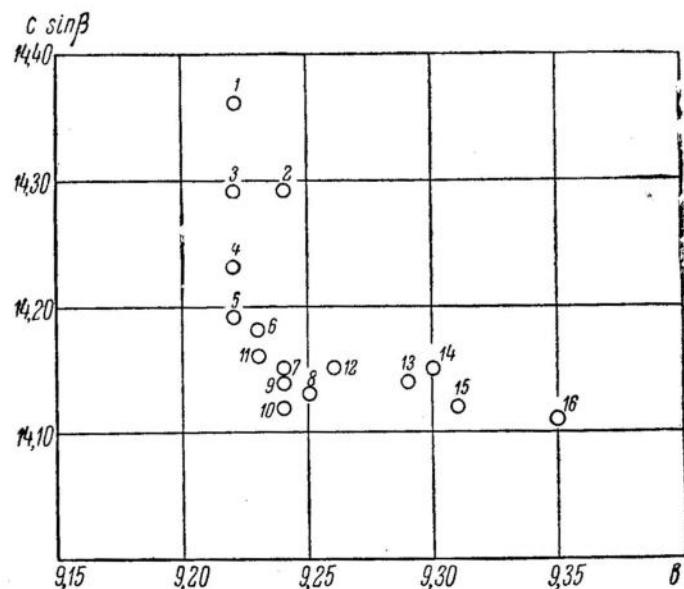


Рис. 2. Зависимость между количеством алюминия, замещающего кремний, и параметром $c \sin \beta$. Номера точек соответствуют указанным в табл. 1

Зависимость между параметрами элементарной ячейки и составом хлоритов позволяет на основе параметров b и $c \sin \beta$ не только производить диагностику хлоритов, но и определять их приближенный состав.

ЛИТЕРАТУРА

- Иванова В. П. Хлориты. Труды Института геологических наук АН СССР, Петрографическая серия. 1949, вып. 120.
- Михеев В. И. Определение минералов группы хлоритов рентгенометрическим методом. Записки Всесоюзного минералогического о-ва. 1953, ч. XXXII, № 3.
- Сердюченко Д. П. Хлориты, их химическая конструкция и классификация. Труды института геологических наук АН СССР, Минералого-геохимическая серия, 1953, вып. 140.
- Brindley a. Robinson. The Mineralogical Society (Clay Minerals group), 1951.
- Engelhardt W. Zeit. Krist., 1942, v. 104.

ОКРАСКА И СВЕЧЕНИЕ МИНЕРАЛОВ В ЛУЧАХ РТУТНО-КВАРЦЕВОЙ ЛАМПЫ

До сих пор при исследовании минералов в ультрафиолетовых лучах главное внимание обращалось на явления свечения [1—3].

В 1947 г. А. С. Уклонским [5, 6] были опубликованы материалы по метахроматизму минералов, т. е. изменению их цвета под влиянием освещения ртутно-кварцевой лампы Баха. Им проведены наблюдения для минералов, окрашенных в красный, желтый, зеленый, синий и фиолетовый цвета, и при этом сделана сравнительная характеристика цвета минерала при дневном освещении с цветом, получаемым при освещении ртутно-кварцевой лампой. Работа по метахроматизму была продолжена в 1949 г. З. М. Протодьяконовой [4] при изучении плеохроизма минералов с помощью поляризационного микроскопа, освещаемого лучами ртутно-кварцевой лампы.

В целях разработки методики диагностирования минералов в лучах ртутно-кварцевой лампы ПРК-4 автором данной работы проведены наблюдения над рядом физических явлений, до сего времени мало освещенных в литературе.

Исследование минералов проводилось в нефильтрованных фиолетовых и ультрафиолетовых лучах портативной ртутно-кварцевой лампы с горелкой ПРК-4, изготавляемой заводом «Красногвардеец». Эта лампа включается в сеть 110 и 220 в через дроссель и трансформатор (понижающий сопротивление), представляет собой лампу дугового разряда и называется горячей ртутно-кварцевой лампой. Дуга образуется внутри лампы в среде ртутных паров и инертного газа. Во время горения она дает спектр с большим содержанием ультрафиолетовых лучей с длиной волн от 365 до 248 мк, а также в меньшем количестве — видимые лучи. В табл. 1 приведено ориентировочное распределение энергии в портативной ртутно-кварцевой лампе ПРК-4 (относительно линии 3650 Å, энергия которой принята за 100%) в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Данные взяты из инструкции Государственного завода по эксплуатации ртутно-кварцевых ламп.

Таблица 1

Длина волны Å	5770	5461	4358	4047	3650	3126	3022	2967	2804	2652	2537	2483
Среднее значение энергии, %	70,4	71,75	62,4	35,9	100	68,0	31,2	14,3	10,3	23,4	26,1	10,5

Из табл. 1 видно, что на видимую область спектра приходится значительная часть энергии. Для данной лампы характерно преобладание длинноволнового ультрафиолетового излучения (3650 Å) над коротковолновым (2483 Å). Из видимых лучей преобладают фиолетовые (4358 Å), зеленые (5461 Å) и желтые (5770 Å); синие же, голубые, оранжевые и красные в излучении лампы ПРК-4 почти отсутствуют. Последнее явление обусловливает резкое изменение окраски для минералов, окрашенных в красный и синий цвета; первые приобретают коричневый до черного цвет, а вторые становятся фиолетовыми. Кроме того, в исходном излучении лампы ПРК-4 более резко подчеркиваются дополнительные окраски для окрашенных минералов.

Портативная ртутно-кварцевая лампа с горелкой ПРК-4 использовалась для свечения минералов с применением светофильтра, поглощающего видимые и короткие ультрафиолетовые лучи и пропускающего длинные ультрафиолетовые лучи (3650 Å).

Для свечения минералов в коротких ультрафиолетовых лучах использовалась установка ЛЮМ-2 со светофильтром УФС-1, пропускающим главным образом короткие ультрафиолетовые лучи (2560 Å). Данная установка относится к типу холодных ртутно-кварцевых ламп с горелкой ПРК-4. Качественная характеристика излучения этой лампы аналогична характеристике горячей ртутно-кварцевой лампы. Только первая в отличие от второй излучает больше коротких ультрафиолетовых лучей (около 90%) и очень немного лучей видимой области (около 10%).

В нефильтрованных лучах портативной ртутно-кварцевой лампы без фильтра, кроме изменения окраски, для минералов отмечалось отражение, поглощение и пропускание лучей. Свечение же в нефильтрованных ультрафиолетовых лучах наблюдалось для тех минералов, которые обладают интенсивным (ярким) свечением. Для нелюминесцирующих минералов в фильтрованных ультрафиолетовых лучах отмечалось окрашивание их в фиолетовый цвет, так как через фильтры наряду с ультрафиолетовыми пропускаются и видимые фиолетовые лучи.

Исследования по изменению окраски и свечению минералов производились в штуфах и зернах (кристаллах), а также в порошке (в черте или дробленом материале). Результаты исследований в нефильтрованных ультрафиолетовых лучах приведены для тех минералов, которые резко изменяют окраску. Для люминесцирующих минералов дано поведение их в фильтрованных ультрафиолетовых лучах, кроме того, минералы описаны по классам, а внутри классов они расположены по алфавиту (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что полученные данные исследований минералов в лучах ртутно-кварцевой лампы с горелкой ПРК-4 можно использовать при их диагностике. Для этой цели необходимо учитывать следующие явления:

1. Изменение окраски минералов в нефильтрованных лучах.
2. Изменение цвета черты в нефильтрованных лучах.
3. Характерную особенность минерала светиться даже в нефильтрованных ультрафиолетовых лучах, обладающих интенсивной люминесценцией.
4. Высокую отражательную способность для минералов с металлическим и алмазным блеском в лучах лампы с горелкой ПРК-4.
5. Для люминесцирующих минералов в фильтрованных ультрафиолетовых лучах устанавливался характер свечения, а для нелюминесцирующих — отмечалась различная степень их окрашивания фиолетовыми лучами. Кроме того, в этих лучах отмечается прозрачность минералов.

На основании данных табл. 2 можно сделать следующие выводы:

1. В нефильтрованных лучах лампы ПРК-4 наиболее характерно изменение окраски для минералов, окрашенных в видимых лучах в красный и синий цвета. Так, например, красные киноварь и реальгар приобретают черную и темнокоричневую окраску, синий ковеллин — фиолетовую, а синяя окраска азурита и лазурита меняется на светлую фиолетовую.

У самородной меди с медно-красной окраской происходит характерное изменение на латунно-желтую с зеленоватым оттенком. Появление зеленовато-желтой окраски указывает на способность меди отражать также желтые и зеленые лучи, которые в значительном количестве излучаются ртутно-кварцевой лампой ПРК-4. Для халькопирита же характерна зелено-желтая окраска, которая выделяет его среди скоплений пирита и пирротина.

Кроме того, в нефильтрованных лучах резко подчеркивается желтый цвет самородной серы. В этих лучах по яркожелтой окраске легко устанавливается тонкораспыленная сера в осадочных породах.

Резкое изменение окраски весьма характерно для лимонита, приобретающего в нефильтрованных лучах яркую зеленовато-желтую окраску, напоминающую окраску самородной серы. По этой

Таблица 2

Минерал	Окраска минерала		
	в видимых лучах	в лучах лампы ПРК-4 без фильтра	в лучах лампы ПРК-4 с фильтром
I. САМОРОДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ			
A. Металлы			
Золото	Золотисто-желтая	Блестящая яркожелтая	Ярко блестящая темно-фиолетовая
Медь	Медно-красная	Блестящая желтая с зеленым оттенком	Ярко блестящая черная с фиолетовым оттенком
Серебро	Серебристо-белая	Блестящая серебристо-белая-сириеватая	Ярко блестящая фиолетовая
B. Неметаллы			
Алмаз	Бесцветная или слабо окрашенная	Иногда светится	Чаше голубое и реже желтое
Графит	Железно-черная	Железно-черная	Блестящая черная
Сера	Желтая различных оттенков	Ярко желтая с зеленоватым оттенком	Черная с фиолетовым оттенком

Минерал	Окраска минерала		
	в видимых лучах	в лучах ламмы ПРК-4 без фильтра	в лучах ламмы ПРК-4 с фильтром
II. СЕРНИСТЫЕ СОЕДИНЕНИЯ (СУЛЬФИДЫ)			
A. Сульфиды с металлическим блеском			
Антимонит	Свинцово-серая, черная	Блестящая желтоватая свинцово-серая, черная	Блестящая темнофиолетовая, черта черная
Борнит	Медно-красная, черная	Железно-черная	Черная с фиолетовым оттенком
Галенит	Свинцово-серая, черная	Блестящая фиолетово-серая в зернах и черте	Блестящая темнофиолетовая
Ковеллин	Индигово-синяя	Яркофиолетовая	Блестящая черная
Молибденит	Голубовато-свинцово-серая	Блестящая яркофиолетово-серая	Блестящая темнофиолетовая
Пирит	Латунно-желтая, черная	Блестящая латунно-желтая, черта черная	Блестящая черная с фиолетовым оттенком

Продолжение табл. 2

Минерал	Окраска минерала		
	в видимых лучах	в лучах лампы ПРК-4 без фильтра	с фильтром
Пирротин	Темная бронзово-желтая, черта черная	Блестящая бронзово-желтая, черта черная	Блестящая фиолетовая (до черной)
Халькопирит	Латунно-желтая с зеленоватым оттенком, черта черная зеленоватая	Блестящая яркозелено-желтая, черта зеленеет	Блестящая темнофиолетовая

Б. Сульфиды с алмазным блеском

Ауригитмент	Золотисто-желтая	Блестящая яркоожелтая с зеленым оттенком	
		Фиолетовая с зеленым оттенком	с фильтром
Киноварь	Аллокрасная	Металловидная железногоричнево-черная	Темнофиолетовая черной
Клейофан с примесью Mn или Cd	Бесцветная, белая или розовая	Не изменяется, но на- чинает слабо светить- ся	Минерал светится до

18*

Продолжение табл. 2

Минерал	Окраска минерала		
	в видимых лучах	в лучах лампы ПРК-4 без фильтра	с фильтром
Марматит	Черная, черта коричневая	Металловидная железногоричнева- яя, черта желтая	Блестящая темнофиолетовая
Реальгар	Оранжево-красная	Темнокоричневая, черта оранжево-желтая	Темнокоричневая до черной, черта оранжево-коричневая

III. КИСЛОРОДНЫЕ СЛЕДИННИЯ

А. Оксиды со стеклянным блеском

Кварц (горный хрусталь)	Бесцветная	Бесцветная с фиолетовым оттенком
Кварц (раухтопаз)	Дымчатая	Желтая, просвечивает
Кварц (аметист)	Светлофиолетовая	Темнофиолетовая, просвечивает
Кварц (жильный)	Белая	Темнофиолетовая

Продолжение табл. 2

Минерал	Окраска минерала			Свечение минерала в коротких и длинных ультрафиолетовых лучах
	в видимых лучах	без фильтра	с фильтром	
Корунд (рубин)	Темнокрасная	Яркокрасная, светится	Минерал светится	Красное (среднее до яркого)
Корунд (сапфир)	Синяя	Фиолетовая	Темнофиолетовая	—

Б. Окислы с алмазным блеском				
Касситерит	Серая или буроватая	Платинисто-серая и желтая	Темнофиолетовая	—
Касситерит	Черная, черта коричневая	Фиолетово-черная, черта желтеет	Черная, черта серофиолетовая	—
Куприт	Кирпично-красная	Металловидная, свинцово-серая	Металловидная черная с фиолетовым оттенком	—

В. Окислы и гидроокислы с полуметаллическим блеском				
Гематит	Черная с вишнево-красной чertой	Блестящая черная, черта чertеет	Черная с фиолетовым оттенком	—

Минерал	Окраска минерала			Свечение минерала в коротких и длинных ультрафиолетовых лучах
	в видимых лучах	без фильтра	с фильтром	
Лимонит земли-стый	Охристо-желтая	Яркая зеленовато-желтая	Темнофиолетовая	—
Магнетит	Черная	Черная	Черная	—
Хромит	Черная, черта серо-коричневая	Черная, черта серо-зеленая	Черная, черта фиолетовая	—

Г. Карбонаты				
Азурит	Лазурно-синяя	Светлофиолетовая	Темнофиолетовая черной	—
Арагонит	Белая	Белая или слабо светится	Минерал светится	Белое, красное и желтое (среднее до яркого)
Гидроциникит	Белая	Белая или слабо светится	»	Голубое или голубовато-белое (среднее)
Доломит	Белая	Белая	Фиолетовая или светится	Красное, оранжевое, розовое и желтое (слабое до среднего)

Продолжение табл. 2

Минерал	Окраска минерала				Свечение минерала в коротких и длинных ультрафиолетовых лучах
	в видимых лучах	без фильтра	с фильтром	в лучах лампы ПРК-4	
Кальцит	Бесцветная, белая или слабо окрашенная	Не изменяется	Фиолетовая или светится	Фиолетовая или светится	Розовое, оранжевое, желтое и белое (слабое до среднего)
Магнезит	Белая	Белая	Фиолетовая, редко светится	Фиолетовая, редко светится	Слабое красное, белое и голубое
Малахит	Зеленая	Серо-зеленая	Фиолетовая	Фиолетовая	—
Сидерит	Буро-желтая	Серожелтая	Темнофиолетовая	Темнофиолетовая	—
Смитсонит	Серебряная	Не изменяется	Фиолетовая, редко светится	Фиолетовая, редко светится	Слабое розовое, голубое только в длинных ультрафиолетовых лучах
Реддерфордит	Желтая	Желтая	Минерал светится	Минерал светится	Зеленое (слабое до среднего)
Церуссит	Белая	Белая	Фиолетовая, редко светится	Фиолетовая, редко светится	Желтое только в длинных ультрафиолетовых лучах

Продолжение табл. 2

Минерал	Окраска минерала				Свечение минерала в коротких и длинных ультрафиолетовых лучах
	в видимых лучах	без фильтра	с фильтром	в лучах лампы ПРК-4	
Шрекингрит	Желтая	Желтая, светится	Минерал светится	Минерал светится	Изумрудно-зеленое (яркое)
Ангидрит	Белая	Белая	Фиолетовая	Фиолетовая	—
Барит	Белая	Белая	Фиолетовая, редко светится	Фиолетовая, редко светится	Белое, розовое, желтое и голубое только в длинных ультрафиолетовых лучах (слабое)
Гипс	Бесцветная или белая	Не изменяется	Фиолетовая, очень редко светится	Фиолетовая, очень редко светится	Желтое, оранжевое и голубое только в длинных ультрафиолетовых лучах (слабое)
Халькантит	Небесно-голубая	Фиолетовая	Темнофиолетовая черной	Темнофиолетовая до	Желтое, реже розовое (среднее)

Е. Фосфаты

Апатит	Бесцветная или белая	Не изменяется	Светлофиолетовая или светится
--------	----------------------	---------------	-------------------------------

Продолжение табл. 2

Минерал	Окраска минерала			Свечение минерала в коротких и длинных ультрафиолетовых лучах
	в видимых лучах	без фильтра	с фильтром	
Апатит	Голубовато-зеленая	Серо-зеленая	Фиолетовая	—
Торбернит	Зеленая	Зеленая	Темнофиолетовая	—

Ж. Вольфрамиты

Гюбнерит	Буровато-красная с желтой чертой	Темнокоричневая, черта яркожелтая	Черная с фиолетовым оттенком	—
Вольфрамит	Черная, черта коричневая	Блестящая черная, черта темножелтая	Черная	—
Шеелит	Белая или желтоватая	Не изменяется или светится в нефильтрованных лучах ЛЮМ-2	Минерал светится	Голубое, редко белое или желтое только в коротких ультрафиолетовых лучах (яркое)

3. Молибдаты

Вульфенит	Желтая и оранжевая	Блестящая зелено-желтая	Темнофиолетовая	—
-----------	--------------------	-------------------------	-----------------	---

Продолжение табл. 2

Минерал	Окраска минерала			Свечение минерала в коротких и длинных ультрафиолетовых лучах
	в видимых лучах	без фильтра	с фильтром	
Повеллит	Белая	Не изменяется или светится в нефильтрованных лучах ЛЮМ-2	Минерал светится	Желто-белое только в коротких ультрафиолетовых лучах (яркое)
Скородит	Серовато-яблочно-зеленое	Зеленая	Фиолетовая до черной	—

И. Арсенаты

Эритрин	Розовая или малиновая	Серая	Темнофиолетовая	—
---------	-----------------------	-------	-----------------	---

К. Силикаты

Амфиболы	Серо-зеленая	Темносерая до черной	Темнофиолетовая	—
Виллемит	Белая	Светится	Минерал светится	Зеленое (яркое)
Гакманит	Бесцветная или белая	Бесцветная или светится	Минерал светится	Желтое и огненно-красное (среднее до яркого)
Гарниерит	Зеленая	Серовато-зеленая	Темнофиолетовая	—

Продолжение табл. 2

Минерал	Окраска минерала		
	в видимых лучах	в лучах лампы ПРК-4 без фильтра	с фильтром
Гранаты	Красная, черная, зеленая	Красные темнеют, черные и зеленые окраску не изменяют	Темнофиолетовая до черной
Дистен	Бесцветная или голубая	Голубой листен становится фиолетовым	Фиолетовая, очень редко светится
Диопсид	Белая	Белая	Фиолетовая, очень редко светится
Лазурит	Синяя	Светлофиолетовая	Черная
Пироксены	Серо-зеленая	Темносерая до черной	Фиолетовая до черной
Сподумен	Белая или зеленоватая	Не изменяется	Минерал светится
Хризоколла	Зеленовато-голубая	Серо-фиолетовая	Темнофиолетовая
Циркон	Бесцветная или имеет различные оттенки	Светится	Минерал ярко светится (яркое)

Продолжение табл. 2

Минерал	Окраска минерала		
	в видимых лучах	в лучах лампы ПРК-4 без фильтра	с фильтром
Циркон (малакон)	Белая	Белая	Фиолетовая
Уранотил	Желтая	Светится	Минерал ярко светится (яркое)
Агакамит	Яблочно-зеленая	Желто-зеленая	Фиолетовая
Галит	Бесцветная, белая	Не изменяется	Фиолестовая. Минерал остается прозрачным или очень редко светится
Котунит	Белая	Светится	Минерал ярко светится
Сильвин	Белая	Белая	Фиолетовая
Сильвин с гематитом	Красная	Темнокоричневая	Черная
Флюорит с примесью урана	Бесцветная, зеленая или фиолетовая	Не изменяется	Минерал светится
	до Темнофиолетовая черной	Темнофиолетовая	» »

своебразной окраске лимонит легко выделяется не только в сплошных массах, но и в виде тонких налетов, а также среди темнобурого гетита и вишнево-красного порошка гематита.

2. Диагностическим признаком может служить изменение цвета окрашенной черты минерала, например: вишнево-красная черта гематита в нефильтрованных лучах лампы ПРК-4 становится черной, красная черта киновари приобретает коричнево-черный цвет, но у реальгара, сходного по окраске с киноварью, наоборот, оранжево-красная черта в этих лучах желтеет. Характерно меняется коричневый цвет черты марматита на желтый. В отличие от марматита коричневая черта вольфрамита слабо желтеет. Следует отметить, что изменение окраски минерала наиболее резко проявляется в черте (порошке), чем в штуфных образцах.

3. Характерная особенность ярко люминесцирующих минералов светиться даже в нефильтрованных лучах ртутно-кварцевой лампы ПРК-4 (горячей и холодной) также может быть использована при диагностике минералов. Например, золотисто-желтое свечение циркона сходно с желтым свечением апатита, но циркон обладает более ярким (интенсивным) свечением, чем апатит, и поэтому в отличие от него в нефильтрованных лучах уже светится. Красное и желтое свечение сфалерита сходно со свечением кальцита, но сфалерит светится более интенсивно, чем кальцит, и даже в нефильтрованных лучах. Урансодержащие минералы (отунит и др.) в ультрафиолетовых лучах обладают интенсивным зеленым свечением и светятся в нефильтрованных лучах, чем отличаются от минералов с средним и слабым зеленым свечением.

4. В нефильтрованных лучах минералы с металлическим, полу-металлическим и алмазным блеском более ярко блестят, чем при обыкновенном свете. Самородные металлы ярко блестят не только в кристаллах (зернах), но и в черте. У минералов же с алмазным блеском в порошке (чертеже) также проявляется алмазный блеск (алмаз, церуссит, кассiterит и др.). Необходимо отметить, что у минералов со смешанным алмазным и металловидным блеском в нефильтрованных лучах лампы ПРК-4 более резко проявляется металловидный блеск (киноварь, марматит, рутил и др.).

Кроме того, у некоторых сульфидов (галенила, халькозина и молибденита) в этих лучах также подчеркивается металлический характер их черты.

5. Анализируя результаты наблюдений по свечению минералов, устанавливаем, что минералы с металлическим и полуметаллическим блеском не люминесцируют, а люминесцируют лишь минералы с алмазным и стеклянным блеском. Но среди минералов с алмазным и стеклянным блеском яркоокрашенные в зеленый или синий цвет (никелем, медью и кобальтом) и темноокрашен-

ные (железом и марганцем) не люминесцируют. Наиболее часто светятся кальцийсодержащие минералы (без магния). Это объясняется тем, что кальций не имеет выраженной склонности к изоморфизму с железом (гасителем люминесценции). Для кальцийсодержащих минералов наиболее широко распространенным активатором свечения является примесь марганца, например, в шеелите, кальците, апатите и сфалерите.

Кроме того, следует отметить склонность к свечению минералов, содержащих цинк (сфалерит, виллемит и гидроцинкит), в которых активаторами свечения являются медь и марганец.

Для урансодержащих минералов характерно свечение с наличием ураниловой группы и дополнительных анионов с фосфором $[PO_4]^{3-}$, кремнием $[SiO_4]^{4-}$ и углеродом $[CO_3]^{2-}$. При этом урансодержащие минералы при наличии кальция (отунит, уранотил и др.) светятся, а при наличии же меди и ванадия свечения не наблюдается.

В заключение по разделу свечения минералов в ультрафиолетовых лучах следует привести краткую характеристику по классам.

Минералы самородных металлов и сульфидов с металлическим блеском, обладающие металлическими химическими связями, свечения не дают. Свечением обладают сульфиды с алмазным блеском сфалеритовой группы, содержащие цинк и кадмий при отсутствии в них железа. Из самородных элементов светится лишь алмаз.

Среди карбонатов интенсивное свечение характерно для шрекингерита, гидроцинкита, арагонита и кальцита, фосфатов — отунита и апатита, а для вольфраматов и молибдатов — яркое свечение кальциевых минералов (шеелита и повеллита). У минералов группы сульфатов свечение проявляется редко и слабо. Минералы группы арсенатов и ванадатов свечения не дают.

Для силикатов с отдельными кремнекислородными тетраэдрами характерное интенсивное свечение проявляется у циркона и виллемита. Силикаты же с цепочечной структурой (пиroxены и амфиболы) почти не люминесцируют (исключением является сподумен и очень редко диопсид). Очень слабо проявляется свечение у силикатов с каркасной структурой; исключением является ярко люминесцирующий гакманит.

Галоиды и фториды обычно не обладают свечением. Среди галоидов исключением являются хлориды свинца (котунит) и среди фторидов — флюорит.

Выявление минералов как в нефильтрованных, так и в фильтрованных ультрафиолетовых лучах помогает диагностировать их не только качественно, но и количественно, так как при этом устанавливается размер и характер распределения минеральных

зерен и агрегатных скоплений в породе и руде. Особенно эти лучи помогают выявлять структуры замещения (халькопирит — ковеллин и др.), а также определять характер тонкопленочных и порошковатых минеральных агрегатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Константинова-Шлезингер М. Л. Люминесцентный анализ. Изд. АН СССР, 1948.
2. Комовский Г. Ф. и Ложникова О. М. Люминесцентный анализ при изучении руд и минералов. Госгеолиздат, 1954.
3. Барсанов Г. П. и Шевелева В. А. Материалы по изучению люминесценции минералов. Труды Минералогического музея АН СССР, 1952, вып. 4; 1953, вып. 5; 1954, вып. 6.
4. Протодьяконова З. М. Экспериментальные исследования по применению метахроматизма в определительной минералогии. Автореферат Среднеазиатского индустриального института, 1949.
5. Уклонский А. С. Метахроматизм минералов. ДАН СССР, 1941, т. XXXII.
6. Уклонский А. С. Материалы по метахроматизму минералов. Труды Среднеазиатского индустриального института, 1947, вып. 2.

Редактор издательства В. Н. Парцевский
Технический редактор Е. Б. Вайнштейн

Сдано в производство 27/II 1956 г.
Подписано в печать 24/V 1956 г.
Уч.-изд. л. 17,05 Бумага 60 × 92¹/₁₆ =
= 9,0 бум. л. = 18,0 печ. л.
T-05174
Заказ 218. Тираж 1200 экз. Цена 13 р. 45 к.

Типография Металлургиздата
Москва, Цветной бульвар, 30

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
64	15 св.	И. В. Иогансену	И. В. Иогансену	Авт.
203	12 сн.	(283 минерала)	(278 минералов)	»
203	11 сн.	214	217	»
209	13 св.	танардит	тенардит	Kopp.
210	4 св.	мульфенит	вульфенит	»
210	11 сн.	нефелин	нефелин	»
212	4 св.	Руайне	Руайе	»
249	4 св.	Fe"Fe ₂ "O ₄	Fe"Fe ₂ '''O ₄	»
255	6 св.	FeFe ₂ O ₃	FeFe ₂ O ₄	Авт.