

✓
Е. И. ДОЛОМАНОВА, Т. А. ЗИБОРОВА, Т. И. ЛОСЕВА,
А. Ф. МАРТЫНОВА, М. А. ПАНОВА

ТУРМАЛИН ОЛОВОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАБАЙКАЛЬЯ И ЕГО ТИПОМОРФНОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Турмалин в оловорудных месторождениях относится к числу «сквозных», широко распространенных минералов. Его роль в составе руд повышается от месторождений высокотемпературных формаций к низкотемпературным. Количество его достигает максимума в месторождениях касситерит-кварц-сульфидной (или касситерит-силикатной) формации. В небольшом количестве он отмечается в оловоносных гранитоидах, пегматитах и пегматоидных обособлениях, генетически связанных с этими гранитоидами. Турмалин является полигенным минералом, так как кристаллизуется вместе с самыми разнообразными минералами, что свидетельствует о широком диапазоне физико-химических условий его образования.

В месторождениях касситерит-пегматитовой формации турмалин, кристаллизующийся в пегматитовую стадию, описан подробно другими авторами (А. И. Гинзбургом, В. А. Корнетовой и др.) и нами не рассматривается. Но кроме этого турмалина, в некоторых месторождениях (Адун-Чолон) наблюдаются кварц-турмалиновые жилы, секущие пегматитовые тела, как правило, не выходящие за их пределы. Турмалин в них образует две генерации. К первой принадлежат крупнокристаллические шерлы макроскопически черного цвета. Под микроскопом видно их зональное строение и разнообразная окраска: оранжевая, серовато-зеленоватая (смесь оранжевой с голубой), зеленовато-коричневая и синяя (рис. 1). Ко второй относится мелкокристаллический турмалин, имеющий голубую окраску под микроскопом. Он местами сечет прожилками турмалин первой генерации (рис. 1), заполняет промежутки между его кристаллами.

В месторождениях касситерит-полевошпат-кварцевой и касситерит-кварцевой формаций турмалин встречается не всегда и обычно в небольших количествах. Как правило, он кристаллизуется позже минералов первой стадии минерализации, определяющих формацию этих месторождений. Из всех изученных месторождений этого типа исключение представляют лишь Зун-Ундурское и Ушмунское месторождения, где турмалина довольно много и он образует две-три генерации. Главная масса турмалина в Ушмунском месторождении кристаллизуется в зальбандах жил и прожилков в виде лучистых агрегатов, ориентированных под различными углами к контакту. Мощность оторочек турмалина достигала местами 8 см, обычно 2—3 см. На месторождении Зун-Ундур турмалин образуется позже главных жильных минералов — касситерита, кварца, полевого шпата — и интенсивно замещает их. Менее интенсивно этот процесс проявляется на Ималкинском месторождении. В других месторождениях (Шумиловском, Молодежном) турмалин наблюдается в тех местах жил, где они секут дайки порфиритов или ксенолиты роговиков.

В месторождениях, залегающих в грейзенизированных песчанико-сланцевых породах, турмалин преимущественно кристаллизуется вблизи жил вместе с кварцем, флюоритом, апатитом. В тонких прожилках, сопровождающих жилы, турмалин часто образуется лишь в участках, где они пересекают полевые шпаты и топаз (Доломанова, 1959). Турмалин корродируется сульфидами и замещается хлоритом, кварцем, мусковитом поздних

генерацій. Мусковит образует псевдоморфозы по турмалину. В виде включений турмалин обнаружен в вольфрамите, касситерите, альбите, флюорите, кварце, апатите, и сам содержит включения рутила, радиоактивных и других минералов. Кристаллы турмалина иногда сростаются в звездчатые агрегаты вокруг арсенопирита и рутила. Обычно макроскопически турмалин первой генерации окрашен в черный цвет. Бесцветные кристаллы очень редки (Ангатуй, Будюмкан). Под микроскопом видно зональное строение кристаллов. Внутренние зоны чаще голубого цвета, а внешние — зеленые, оранжевые и желтые. Интенсивность окраски варьирует, и нередко можно наблюдать чередование зон, окрашенных в один и тот же цвет разной интенсивности. На некоторых месторождениях турмалин в центре жил голубой, а в зальбандах и во вмещающих жилах породах — пятнистый, желтовато-зеленый. Внутри одних кристаллов турмалина образуются трубчатые полые полости; другие кристаллы в вершине расщепляются на ряд мелких игольчатых кристаллов. Размер кристаллов турмалина варьирует в широких пределах. Наиболее крупные наблюдались на Ушмунском месторождении, где они достигали 10—12 см в длину и 6 мм в поперечнике. Окрашенные кристаллы плеохроируют. Плеохроизм выражается в изменении интенсивности окраски одного и того же тона.

Турмалин второй генерации голубовато-серый, темно-зеленый и редко черный. Под микроскопом — зеленовато-коричневый и реже голубой. Более крупные кристаллы обычно окрашены в оба цвета одновременно, пятнами; более мелкие — чаще голубые. Некоторые кристаллы турмалина зональные: у одних — внутренние зоны голубые, а внешние бесцветные или желтовато-коричневые, у других — наоборот. Турмалин второй генерации кристаллизуется в трещинках кварца первой генерации, ориентированных перпендикулярно контактам жил; нарастает на стенки трещин граниами призмы; образует скопления размером до 4×2 см; проникает по контактам жил и вмещающих их пород, интенсивно замещая те и другие. Наиболее тесно турмалин ассоциирует с касситеритом и флюоритом. Касситерит нарастает на турмалин, заполняет промежутки между его кристаллами, иногда корродирует турмалин. Турмалин бывает включен в кварц и арсенопирит второй генерации или окаймляет их и наблюдается между листочками мусковита. Местами турмалин этой генерации также замещается мусковитом.

Турмалин третьей генерации голубовато-зеленоватого цвета, мелкокристаллический (доли миллиметра). Под микроскопом большинство кристаллов турмалина окрашено в голубой цвет. Один или вместе с другими минералами (кварцем, касситеритом, мусковитом, арсенопиритом, хлоритом, пиритом) турмалин образует прожилки. Мощность прожилков от 1 мм до 4 см. Более крупнокристаллические скопления турмалина снаружи, как бахромой, обрастают мельчайшими кристаллами турмалина же и иногда касситеритом. Турмалин не только сечет прожилками рудные жилы и грейзены, но местами метасоматически замещает и те и другие близ контакта последних друг с другом. Растворы, из которых он кристаллизовался, в этом случае проникали по контактам жил и вмещающих пород. В этих прожилках встречаются обломки кварца, арсенопирита, турмалина, касситерита первой генерации.

Турмалин третьей генерации кристаллизуется в трещинках спайности флюорита или в трещинках в кварце и в других минералах. Иногда он переполняет своими включениями кварц третьей генерации, располагаясь в нем беспорядочно или согласно с кристаллографическими направлениями. Турмалин окаймляет арсенопирит третьей генерации, заполняет пространство между зернами в его скоплениях. Он также корродирует турмалин первой генерации, проникает в трещинки его и замещает перемятый в тектонических зонах мусковит первой генерации.

Турмалин в месторождениях касситерит-кварц-сульфидной формации образует 4—6 генераций (Ингодинское, Шерловая Гора). В пределах

месторождений он распределен неравномерно. Турмалин слагает жилы, прожилки, гнезда, заполняет пустоты и поры во вмещающих породах. В большинстве случаев он преобладает над сопутствующими ему минералами (кроме кварца) и редко уступает им по количеству. Внешне различаются почти черные, бутылочно-зеленые, коричневые или бурые и, очень редко, бесцветные кристаллы (Ингодинское месторождение, Шерловая Гора).

Под микроскопом окраска турмалина такая же разнообразная. В прожилках среди роговиков нередки желтые, оранжево-коричневые, зеленовато-коричневые турмалины. Нередко можно видеть совмещение разных окрасок в одном кристалле турмалина. Внешне такие кристаллы кажутся однородными. Интенсивность окрасок варьирует.

Особенно велико разнообразие турмалинов на месторождении Шерловая Гора. Так, травяно-зеленый турмалин (рис. 2) в небольших количествах встречается в сидерофиллит-топаз-кварцевых и кварцевых грейзенах по периферии гранитной интрузии, где он ассоциирует с касситеритом, ферберитом, арсенопиритом, сфалеритом, халькопиритом и с мелкими прозрачными идиоморфными кристаллами кварца, иногда двуконечными (обр. 91). Все эти минералы располагаются в порах и трещинах грейзенов, нарастают на минералы, слагающие грейзены, замещают некоторые из них. В тектонических зонах турмалин вместе с сульфидами цементирует обломки пород и кварц-топазовых жил. Размер кристаллов турмалина не превышает нескольких миллиметров, чаще составляет десятые доли миллиметра. Значительно больше турмалина в многочисленных жилах и прожилках штокверка, залегающего в кварцевом порфире, и несколько меньше в аналогичных образованиях в плагиогранитах и порфиритах.

Первым образуется оранжевый турмалин. За ним кристаллизуются коричневый, зеленовато-коричневый и темно-зеленый. К третьей генерации относятся синий и голубой турмалины. К четвертой — голубовато-зеленый или зеленовато-голубой в зависимости от преобладания той или иной окраски. К пятой генерации принадлежит светло-зеленый турмалин, а к шестой — бесцветный. В том же порядке ослабевает интенсивность окраски, уменьшается величина кристаллов и возрастает количество лучистых образований турмалина. В сферолитах турмалина последних двух генераций тончайшие кристаллы сростаются по призме так, что отдельные кристаллы не различимы.

Оранжевый турмалин первой генерации (рис. 3) наблюдался в прожилках, залегающих в роговиках, окружающих гранитную интрузию, вместе с коричневым биогитом, апатитом, ортитом, анагазом, рутилом, флюоритом, молибденитом. Все вместе они замещают ранее образованные плагиоклаз-кварцевые и топаз-кварцевые прожилки. Турмалины часто зональны, зональность обусловлена чередованием зон, окрашенных с разной степенью интенсивности в один или несколько цветов. Под влиянием гидротермальных растворов более поздних стадий минерализации оранжевый турмалин превращается в темно-коричневый и серовато-зеленый вокруг вкрапленности сульфидов и сопровождающего их оранжево-коричневого биотита. Это придает турмалину пестрый, пятнистый или мозаичный вид. Замена оранжевой окраски на голубую происходит в местах, насыщенных газом-жидкими включениями. Эти включения представляют собой реликты тех щелочных растворов, которые вызвали интенсивную альбитизацию плагиоклазов.

Более разнообразный по окраске турмалин второй генерации слагает прожилки и метасоматические зоны. Кроме агрегатов с различно ориентированными преимущественно мелкими кристаллами, турмалин образует разнообразные по строению и окраске сферолиты. Одни из них окрашены в коричневый цвет или в желтовато-коричневый, а снаружи в зеленый цвет. В других различают ядра, сложенные тонкозернистым голубым турмалином, на которые нарастают игольчатые бутылочно-зеленые кристал-

лы. У третьих в центре находится более крупный зеленый кристалл, обросший мелкими зелеными и желтовато-зелеными кристаллами.

Сферолиты и звездчатые агрегаты турмалина более присущи кварц-турмалиновой метасоматической породе, чем кварц-турмалиновым прожилкам и жилам, заполняющим трещины. В метасоматических зонах турмалин располагается в виде полос различной мощности, сложенных его кристаллами размером от десятых долей миллиметра до криптокристаллического. Полосы последнего играют подчиненную роль. Они наиболее узкие. Кроме кварца, турмалин второй генерации тесно ассоциирует с разнообразными сульфидами, флюоритом, монацитом, ильменитом, рутилом, апатитом, мусковитом, хлоритом, золотисто-коричневым биотитом, коричневым касситеритом. В этом турмалине голубая окраска наблюдалась вокруг цепочек газово-жидких включений, вдоль трещинок в нем, заполненных более поздними минералами. В отдельных местах на стенках трещин в коричневом турмалине нарастают щетки голубого, еще более мелкого, турмалина.

Турмалин второй генерации замещает плагиоклазы, топаз, лепидомеллац, актинолит, кварц более ранних стадий минерализации. Реликты некоторых из этих минералов сохраняются среди турмалина и замещаются мусковитом, а топаз — еще корундом и зеленой шпинелью (Шерловая Гора, Ингодинское месторождение).

Голубой и синий турмалин, относящийся к третьей генерации, наиболее широко распространен в рудных телах Шерловогорского месторождения, контролируемых меридиональным сбросом, а также древним и молодым северо-восточными разломами. Эти турмалины слагают прожилки, жилы, метасоматические зоны и наряду с кварцем пацело замещают большие площади кварцевых порфиров, образуя кварц-турмалиновую породу. В порфиритах и плагиогранитах они замещают преимущественно перетертые их разности в зонах милонитизации. Оба турмалина заполняют трещинки и поры во всех породах, вмещающих гранитную интрузию, секут прожилками описанные выше разновидностями турмалинов, замещают ранее выделившиеся другие минералы.

Кристаллы синего турмалина разнообразны по величине, наиболее крупные из них достигают 1 мм в поперечнике. Обычно они имеют зональное строение. У одних кристаллов темно-синяя, почти черная, зона располагается внутри, а голубая — снаружи. Иногда эти зоны разделены зеленовато-коричневой. У других кристаллов внешняя зона зеленовато-серая, средняя — синяя, а внутренняя — голубая или почти бесцветная. У третьих кристаллов зеленовато-коричневая внутренняя зона окружена индигово-синей, переходящей к периферии в темно-синюю, почти черную. Разноокрашенные зоны часто не имеют правильных очертаний, так как внутри кристаллы имеют сложное перистое или тонкоиглольчатое строение, т. е. состоят из группы мелких кристаллов, заключенных в один каркас (рис. 4). В этих кристаллах сосредоточено много мелких зерен рудных минералов.

Встречаются и однородно окрашенные кристаллы, плеохроирующие по N_0 — темно-синим, а по Ne розовато- или желтовато-коричневым цветом. Все другие кристаллы плеохроируют по N_0 в синих и голубых тонах, а по Ne в светло-сиреневых. Кроме простых и сложных кристаллов, наблюдаются и сферолиты, в которых концы кристаллов бывают бесцветными или голубыми. Синий и голубой турмалин также кристаллизуется вместе с кварцем, касситеритом, флюоритом, некоторыми сульфидами железа и сидеритом.

Турмалин четвертой генерации имеет ограниченное распространение и наблюдался лишь в метасоматических зонах древнего разлома северо-восточного простирания и в прожилках, сопровождающих эти зоны. Он, так же как и предыдущие турмалины, образует зоны. Плотные массы турмалина в этих зонах образуют лучистыми его агрегатами, в которых от-

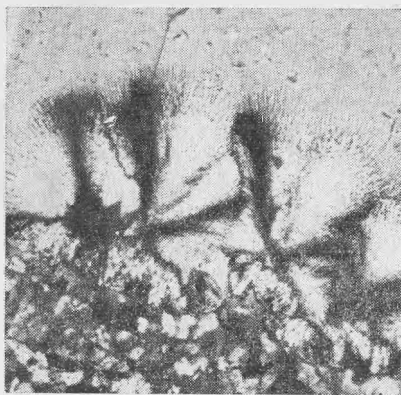


Рис. 5. Сферолиты бесцветного турмалина. Месторождение Шерловая Гора, увел. 150, николи полускращены

дельные кристаллы более крупные и имеют тонкозональное строение. В центре они светло-зеленые, в середине голубовато-зеленые, а снаружи слегка окрашены в зеленоватый цвет. Редко в центре находится желтая зона. В отдельных местах на «бахрому» турмалина парастают мелкозернистые кварц и сульфиды. Зоны такого строения чередуются с зонами несколько более крупнокристаллического гребенчатого кварца, лучистого турмалина, игольчатого касситерита, сульфидами и флюоритом. В карбонатно-сульфидных зонах пластинчатый кальцит и турмалин образуют совместные лучистые агрегаты. Кроме упомянутых минералов турмалин ассоциирует с разнообразным по составу хлоритом, зеленым биотитом и альбитом. В тех местах, где сульфиды нарастают, на лучистые агрегаты турмалина, концы его кристаллов замещаются карбонатами.

Еще реже и в меньшем количестве наблюдается светло-зеленый тонкоигольчатый (порошковатый) турмалин пятой генерации. Звездчатые агрегаты его включены в тонко- и мелкозернистый кварц. Иногда вместе с флюоритом, имеющим сферолитовое строение, этот турмалин слагает зальбанды кварцевых прожилков и содержит тончайшие выделения рудных минералов или кристаллизуется в виде тонких игольчатых кристаллов в зальбандах флюоритовых прожилков.

Бесцветный турмалин шестой генерации еще более редок. Его сферолиты имеют тонкозональное строение (рис. 5). Он образует маломощные зонки в кварц-серицитовый породе, образовавшейся по кварцевому порфиру, которые чередуются с зонками тонкозернистого кварца, бесцветного хлорита и флюорита, или цементирует обломки кварц-турмалиновой породы. В других месторождениях касситерит-кварц-сульфидной формации, залегающих в однородных породах (гранитах или песчанико-сланцевых), такого разнообразия турмалинов не наблюдалось.

Химический состав турмалина. Химический состав турмалина определялся спектральным, рентгеноспектральным и химическим анализами в лабораториях ИГЕМ АН СССР.

Спектральный анализ. Описанные выше турмалины принадлежат к шести генетическим группам месторождений, представленным в табл. 1. Турмалины каждой группы характеризуются определенным набором элементов-примесей. Одни из них присутствуют во всех или многих типах турмалинов, другие — специфичны. Всего обнаружено 30 элементов-примесей.

В каждой из выделенных групп перечень присутствующих элементов или их значение неодинаковы. Тем не менее можно сделать следующие выводы.

1. Разнообразие постоянно присутствующих элементов-примесей уменьшается от высоко- к низкотемпературным месторождениям; пере-

Таблица 1

**Элементы-примеси в турмалинах по данным полуколичественного
спектрального анализа**

Генетическая группа месторождений	Обнаруживаются		
	всегда	часто	редко
I. Касситерит-пегматитовая формация	Be, Ca, Ti, Cu, Ga, Sn, Ba	Li, Zn, Pb	Sc, Mn, Nb
II. Пегматоидные выделения в оловоносных гранитах	Be, Ca, Ti, Mn, Zn, Ga, Sn	V, Nb, Cu	Li, Sr, Y, W, As, Pb, Co, Ni, Mo
III. Жилы из месторождений касситерит-полевошпат-кварцевой формации	Ti, Mn, Ga	Li, Be, Ca, V, Cu, Zn, Sn, Pb	P, Sc, Nb
IV. Турмалино-кварцевые жилы, секущие пегматитовые тела	Be, Mn, Cu, Ga, Sn	Ca, Ti, V, Ba, Zn, Mo	Sc, Cr, Sr, Nb, Ge, Co
V. Жилы из месторождений касситерит-кварцевой формации	Ca, Ti, Mn, Ga, Sn	Be, V, Cu, Zn, Pb	Li, P, Sc, Cr, Sr, Zr, Nb, Ba, W, Ge, As, Ag, Bi, Co, Ni, Mo
VI. Жилы и штокверки из месторождений касситерит-кварц-сульфидной формации	Ti, Mn, Sn	Be, Ca, V, Sr, Cu, Zn, Ga, Pb	P, Sc, Cr, Y, Zr, Nb, Ba, W, Ge, As, Ag, Sb, Bi, Co, Ni, Mo

чень спорадически обнаруживаемых элементов-примесей, наоборот, увеличивается в том же направлении.

2. В турмалинах всех генетических групп всегда присутствуют Ti и Sn; часто отмечаются Be, Ca, Cu, Ga, Mn.

3. С понижением температуры образования турмалина увеличивается количество и разнообразие халькофильных элементов-примесей в нем.

4. Сравнение содержаний элементов-примесей, пересчитанное на атомные количества, позволяет выявить тенденцию распределения элементов в турмалинах из выделенных генетических групп. Так, содержание Li, Ti, Y, Zn, Ga, Sn снижается от первой к шестой группе, а Nb — от второй к шестой; количество Sc, V, Cr, Sr, Zr, Ge, Ag, Ni, As, Sb, Bi увеличивается от первой к шестой группе. Поведение остальных элементов-примесей менее закономерно (рис. 6).

Рентгеноспектральный микроанализ. Рентгеноспектральным микроанализом в лаборатории ИГЕМ АН СССР определялся химический состав разноокрашенных зон турмалина, включений микроминералов в нем и осадков на стенках вакуолей, выпавших из консерватов минералообразующей среды. В результате проведенных исследований выяснилось, что не только разноокрашенные зоны, но и зоны одной и той же тональности в разных турмалинах имеют несколько различный состав.

В турмалине из пегматоидных обособлений в граните Ушмунского месторождения светло-голубая зона от желто-коричневой отличается меньшим содержанием марганца, титана, натрия и большим — кальция; железо, кремний, алюминий, калий в обеих зонах содержатся в близких количествах (рис. 7).

В менее однородном турмалине первой генерации из оловоносных жил того же месторождения наблюдаются вариации состава не только в разноокрашенных зонах, но и в зонах одной и той же или близкой по тональности окраски. Так в серовато-голубых и желтых зонах заметно колеблется содержание кальция, титана, магния и менее резко изменяется содержание железа и марганца. В серо-голубых зонах, по сравнению с желтыми, меньше кальция, титана, магния. Содержание марганца и железа в одних зонах меньше, в других больше, чем в желтых (рис. 8).

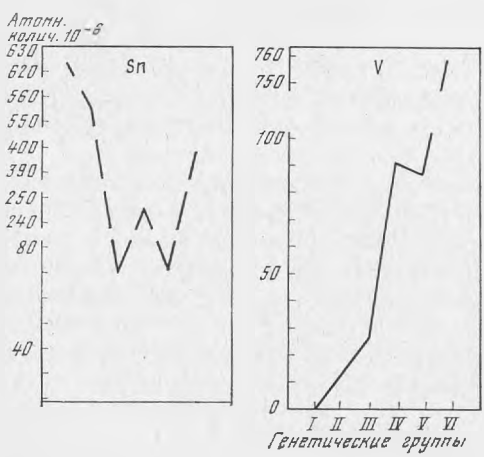
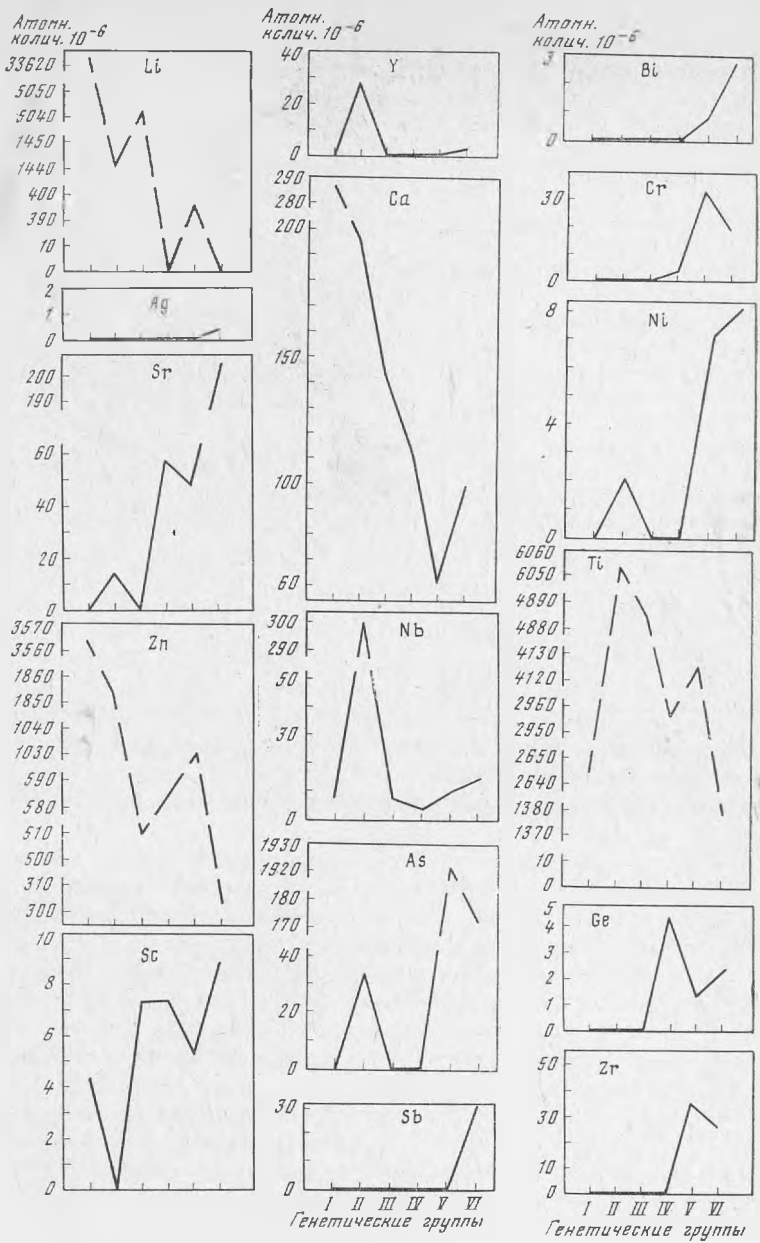


Рис. 6. Распределение элементов-примесей в турмалинах различных генетических групп

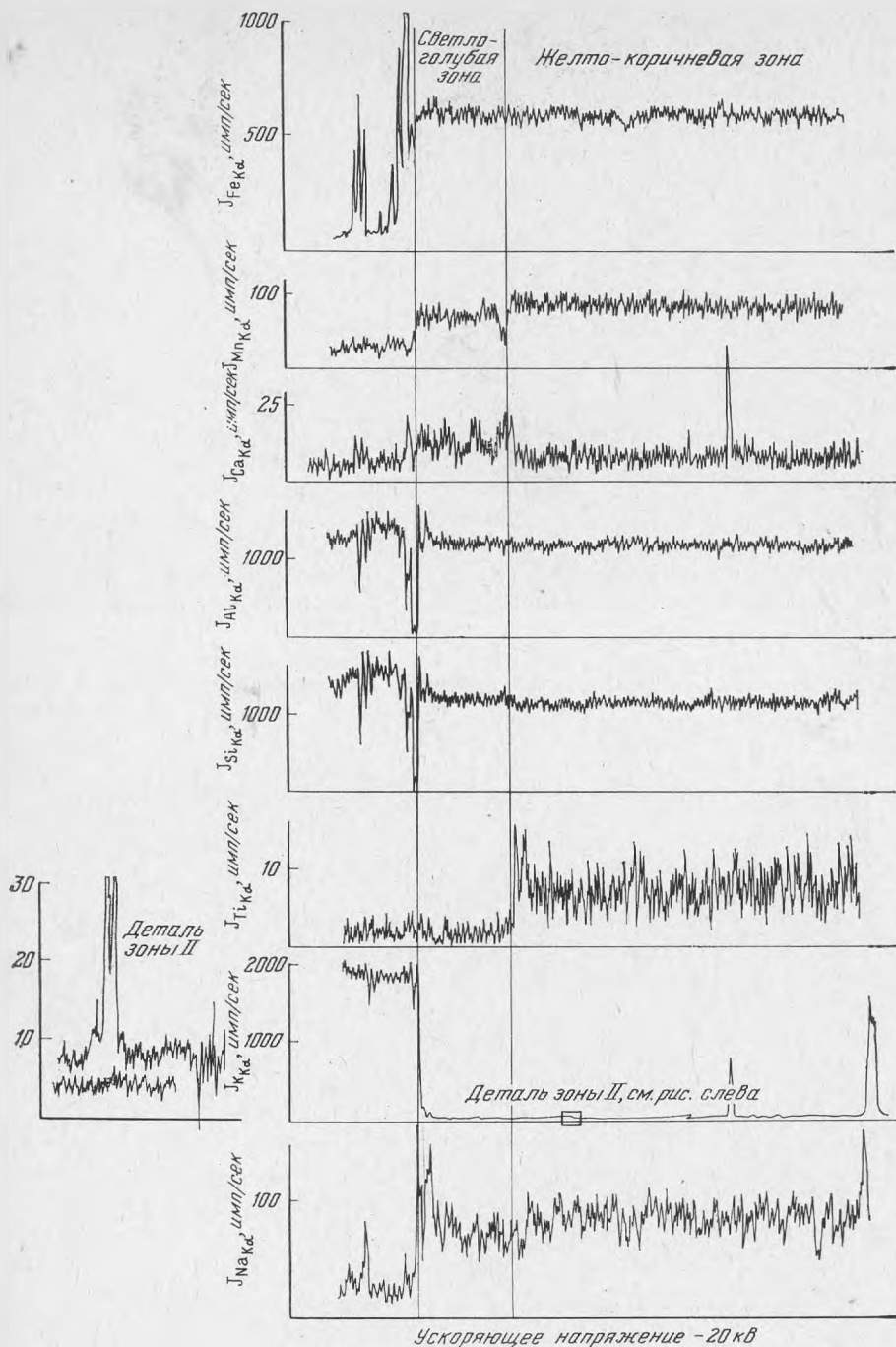


Рис. 7. Кривые распределения элементов в разноокрашенных зонах турмалина из пегматитных обособлений в граните Ушмунского месторождения

Темно-желтая от желтой зоны отличается большим содержанием магния, марганца, натрия, титана, цинка и меньшим — кремния и железа; содержания алюминия и кальция очень близкие. По сравнению с этими зонами голубая зона содержит больше кремния, алюминия, магния, кальция и меньше марганца, титана и цинка. Количество железа и натрия промежуточное между различными по интенсивности желтыми зонами (рис. 9, а).

В турмалине из месторождения Зун-Ундур касситерит-кварцевой формации в желтой зоне больше кремния, титана, железа, кальция, натрия и меньше магния, чем в голубой. Содержание алюминия, марганца и олова в обеих зонах почти одинаковое (рис. 9, б). Так, в турмалине из месторождения Малая Кулинда (пегматитовая формация) зеленые зоны содержат больше кальция, титана, цинка и меньше алюминия и кремния, чем голубые зоны. Количества железа, магния, натрия и марганца очень близкие (рис. 9, в).

В наиболее широко распространенном турмалине в штоковке сопки Большой Шерловогорского месторождения установлено неоднородное содержание магния, марганца, натрия и титана в зонах роста турмалина. Все они, кроме титана, преобладают во внешней зоне кристалла. Титан распределен неравномерно в зонах роста, участками, и его больше во внутренней зоне, чем во внешней. Цинк в турмалине присутствует в очень незначительных количествах (рис. 10).

В виде микровключений в турмалинах обнаружены рутил, содержащий примесь олова (рис. 11), вольфрамит, флюорит, кварц. Таким образом, можно полагать, что оптическая неоднородность турмалина, описанная выше, обусловлена разнообразием химического состава отдельных зон турмалина. Обнаруженные спектральным анализом некоторые элементы в одних случаях, по-видимому, входят в решетку турмалина, в других — в состав микровключений минералов-примесей (титан, кальций, кремний, марганец).

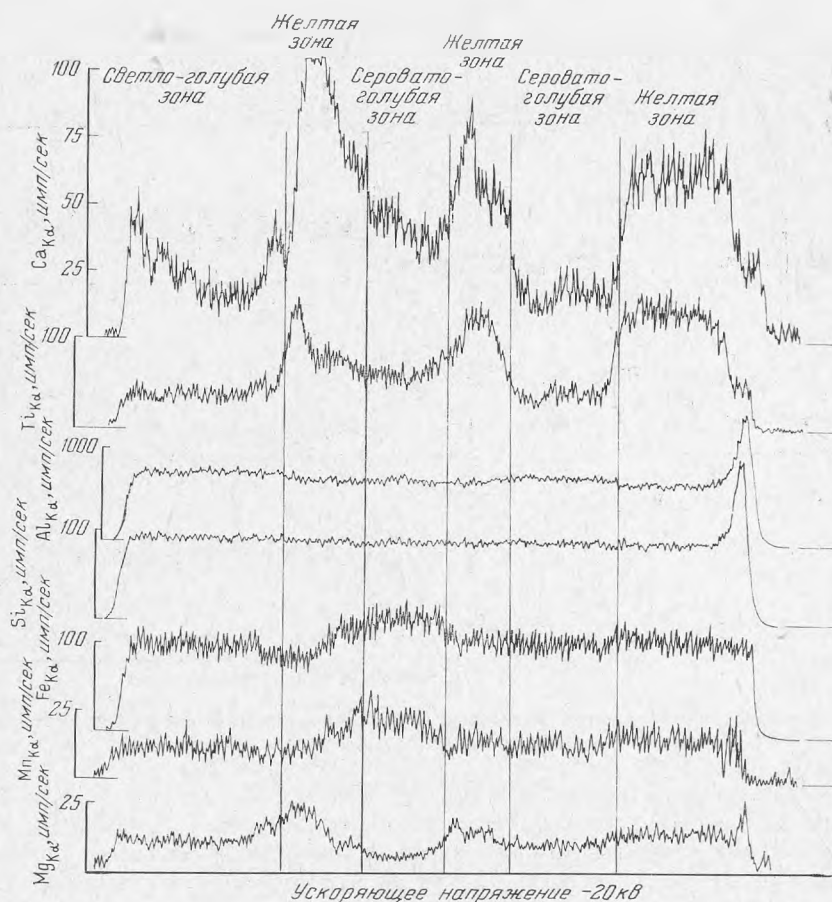


Рис. 8. Кривые распределения элементов в разноокрашенных зонах турмалина из жилы Ушмунского месторождения

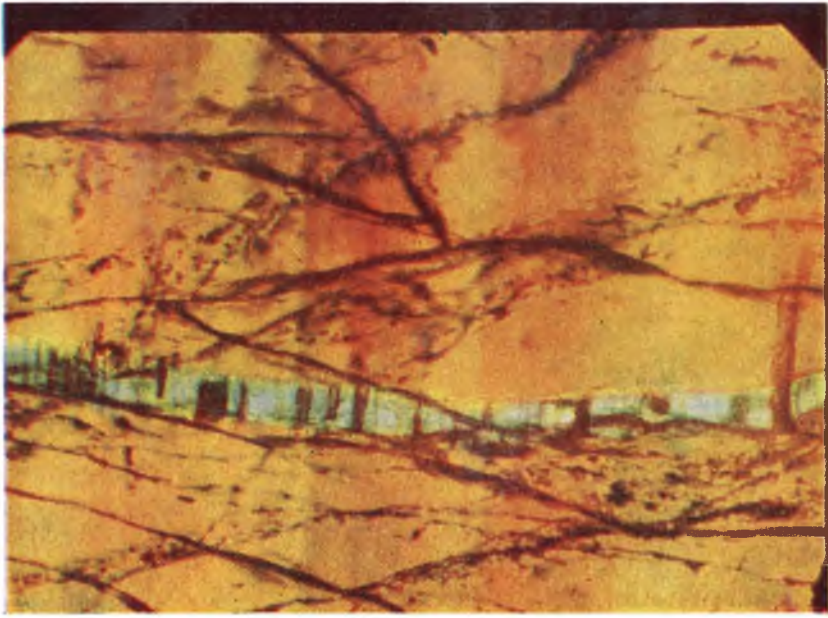


Рис. 1. Зональная окраска шерла первой генерации. Оп сечетея прожилками голу-
бого турмалина второй генерации. Месторождение Адуи-Чолои, увел. 60, без ана-
лизатора

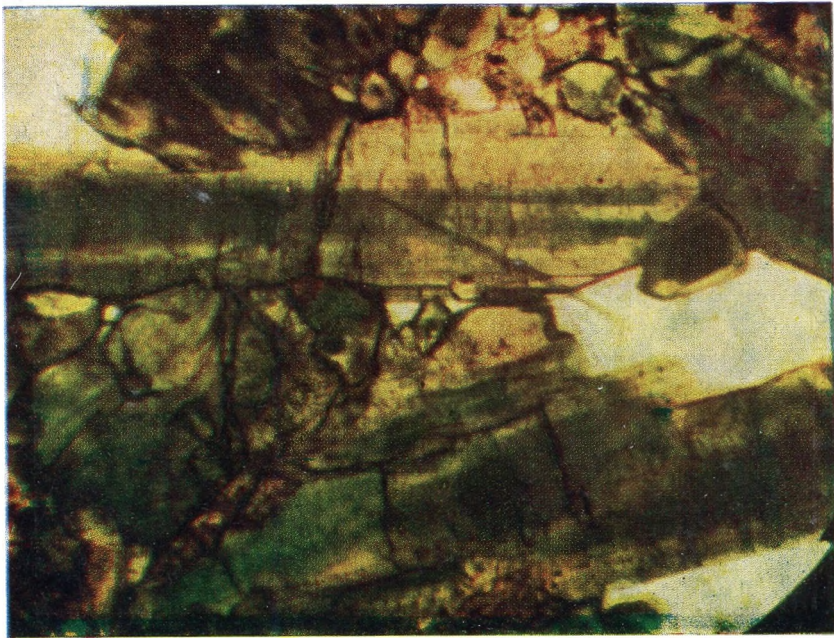


Рис. 2. Зональный травяно-зеленый турмалин из грейзена. Месторождение Шерло-
вая Гора, увел. 60, без анализатора



Рис. 3. Оранжевый турмалин из прожилков в роговиках. Месторождение Шерловая Гора, увел. 60, без анализатора

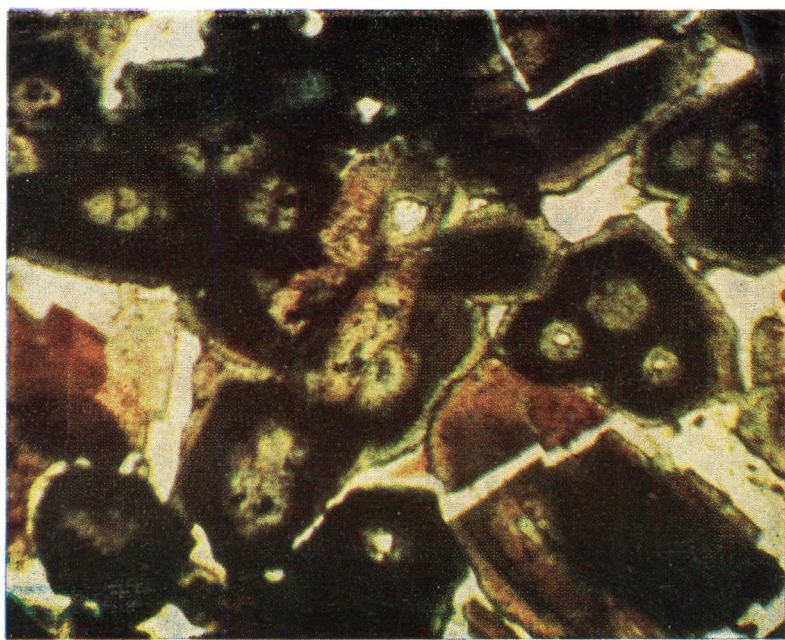


Рис. 4. Шерсть окрашена в синий, голубой и зеленый цвета. Шерловая Гора, увел. 60, без анализатора

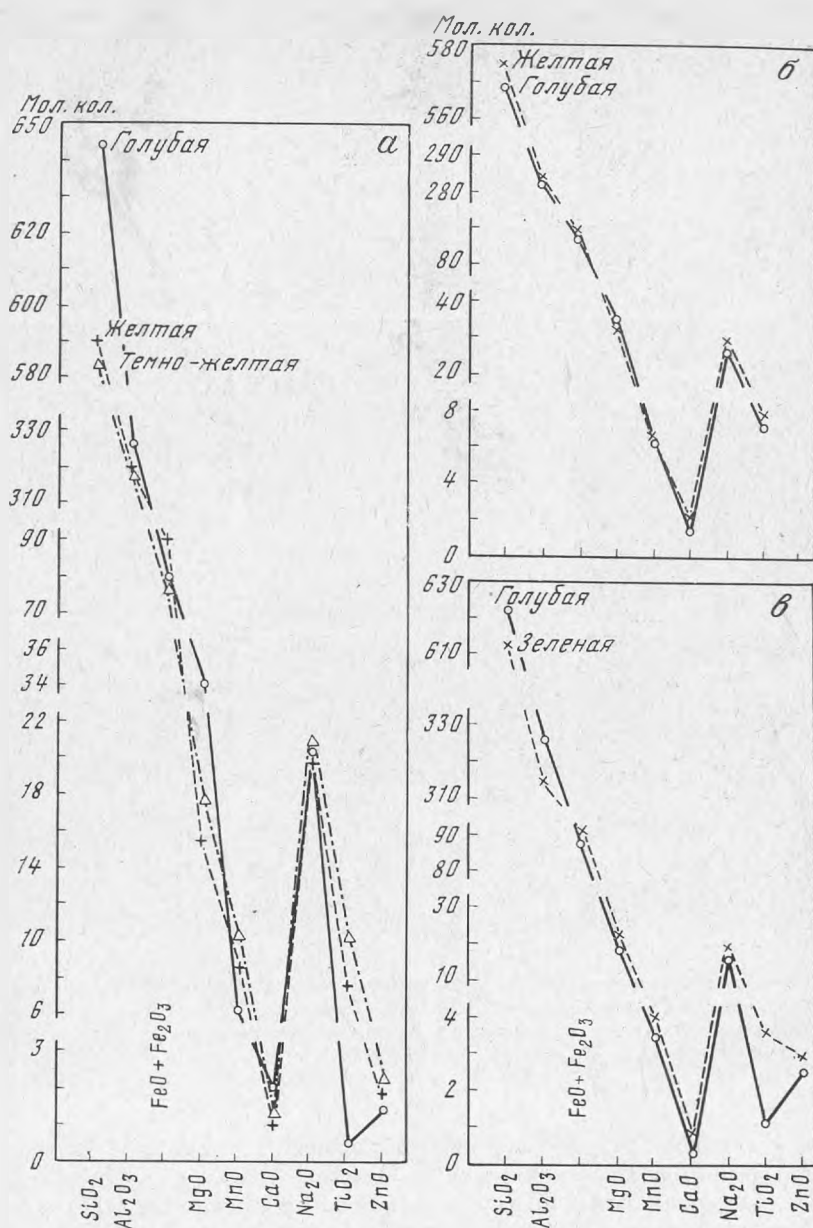


Рис. 9. Состав разноокрашенных зон турмалина, месторождения Ушмунского (обр. 111) (а), Зун-Ундур (обр. 398) (б), Малая Кулинда (обр. 1) (в)

Включения минералообразующей среды в вакуолях турмалина разнообразны по форме и содержанию. Наиболее крупные по размерам включения встречаются в турмалинах из пегматитовых жил, пегматоидных обособлений и высокотемпературных гидротермальных жил (рис. 12). Часто форма включений трубчатая. Длинной осью они ориентированы параллельно удлинению кристаллов турмалина. Более редки овальные и неправильной формы включения.

В турмалинах из пегматитовых жил (первая генетическая группа) наиболее ранние включения состоят из пузырька газа, жидкой и твердой фаз. Твердая фаза в большинстве случаев занимает большую часть вакуоли (рис. 12, а, в, д). Это, по-видимому, свидетельствует о высокой концен-

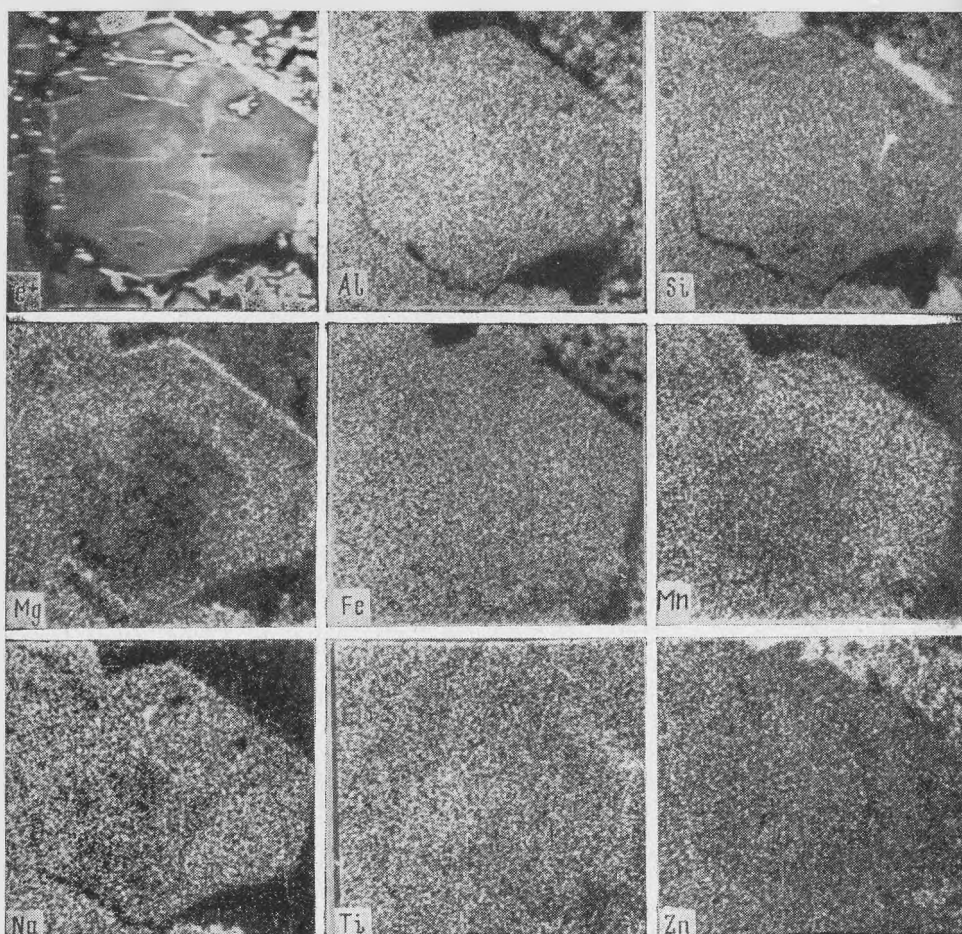


Рис. 10. Распределение элементов в турмалине (обр. 2032) пятой стадии минерализации из штоковерка месторождения Шерловая Гора.

Растровое изображение турмалина в поглощенных электронах — e^+ ; в рентгеновском излучении ($K\alpha$) — Mg, Al, Mn, Na, Ti, Fe, Si, Zn

трации растворов, из которых кристаллизовался турмалин. Более поздние включения, располагающиеся преимущественно по залеченным трещинкам, содержат жидкую фазу и небольшой пузырек газа. Пузырек газа в вакуолях занимает не более $1/3$ ее объема (рис. 12, б). Осадки в вакуолях чаще имеют неправильную форму, но иногда отчетливо различимы кубические и пластинчатые (или чешуйчатые) кристаллы. Кроме описанных выше включений, встречаются включения газа, или жидко-газовые, заключенные в вакуолях, имеющих отрицательную форму кристаллов турмалина. В жидко-газовых включениях газ занимает от 70 до 90% объема вакуоли. Включения трубчатой формы приурочены к зонам роста турмалина и к границе цветковых зон.

В турмалинах из турмалино-кварцевых жил, секущих пегматитовые тела (четвертая генетическая группа), но не выходящих за их пределы (гидротермальная стадия в пегматитах), также часты трубчатые, но очень мелкие включения. Нередко они располагаются последовательно, цепочками в зонах роста кристаллов. Газовая фаза в них занимает от 35 до 15% объема. Встречаются и минералы-узники, но они едва различимы даже при больших (1200) увеличениях. Наблюдать и изучать включения

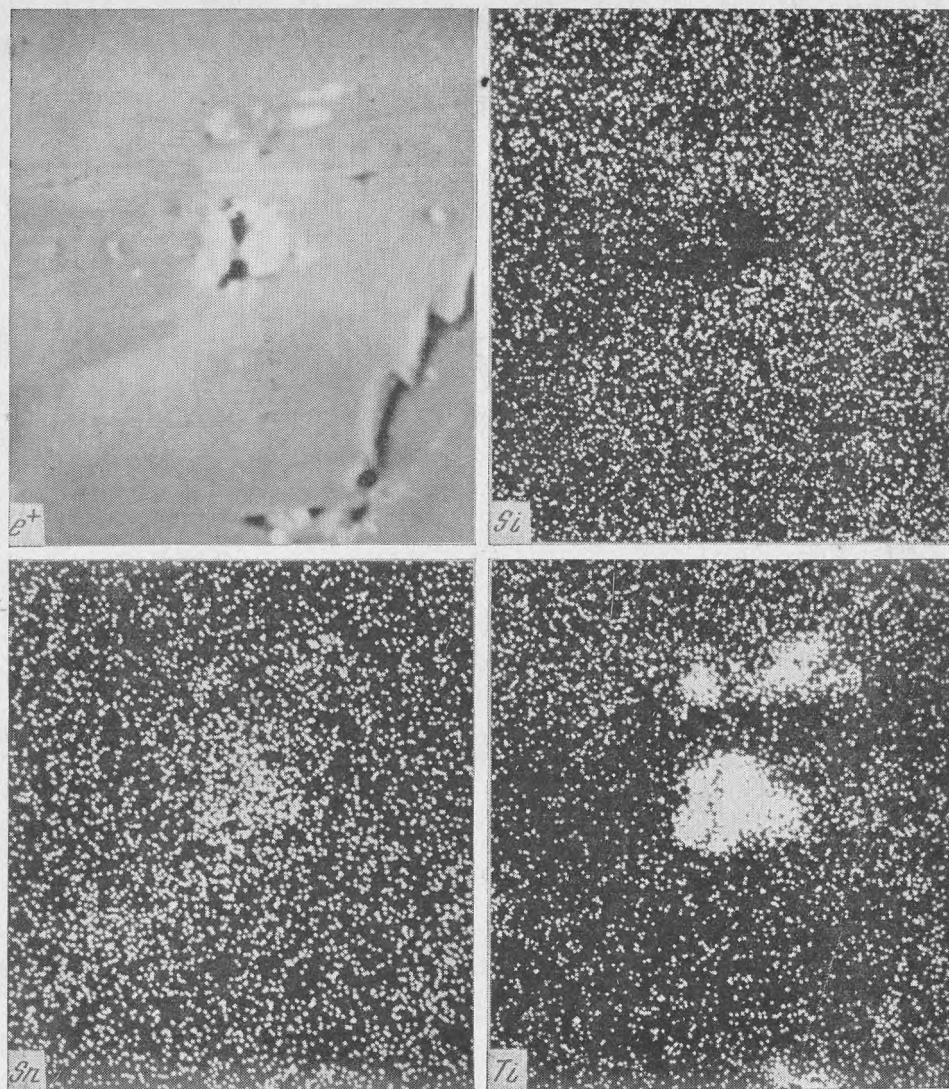


Рис. 11. Включение рутила с примесью олова в турмалине. Размер кадра 100×100 мкм. Растровое изображение рутила в поглощенных электронах $-e^+$; в рентгеновском излучении — $Ti K_{\alpha}$, $Sn L_{\alpha}$, $Si K_{\alpha}$.

очень трудно из-за интенсивной окраски турмалина. Большинство включений ориентировано параллельно L_3 турмалина.

В турмалинах из пегматоидных обособлений в гранитах (вторая генетическая группа) большинство газовой-жидких включений располагается в голубой центральной зоне и меньше их в периферической желтой зоне. Нередко эти включения сосредоточены и на границе зон роста. Форма их также чаще трубчатая. Размеры включений небольшие — $0,02 \times 0,001$ мм.

В турмалинах из месторождений касситерит-полевошпат-кварцевой формации (третья генетическая группа) много газовой-жидких включений трубчатой, треугольной и неправильной формы. В первых двух типах вакуолей на стенках их встречаются мельчайшие минералы-узники, плотно примыкающие друг к другу или нарастающие друг на друга. Газовая фаза в них занимает различный объем, примерно от 50 до 20%. Они также располагаются по зонам роста (рис. 12, б, г, е, ж).

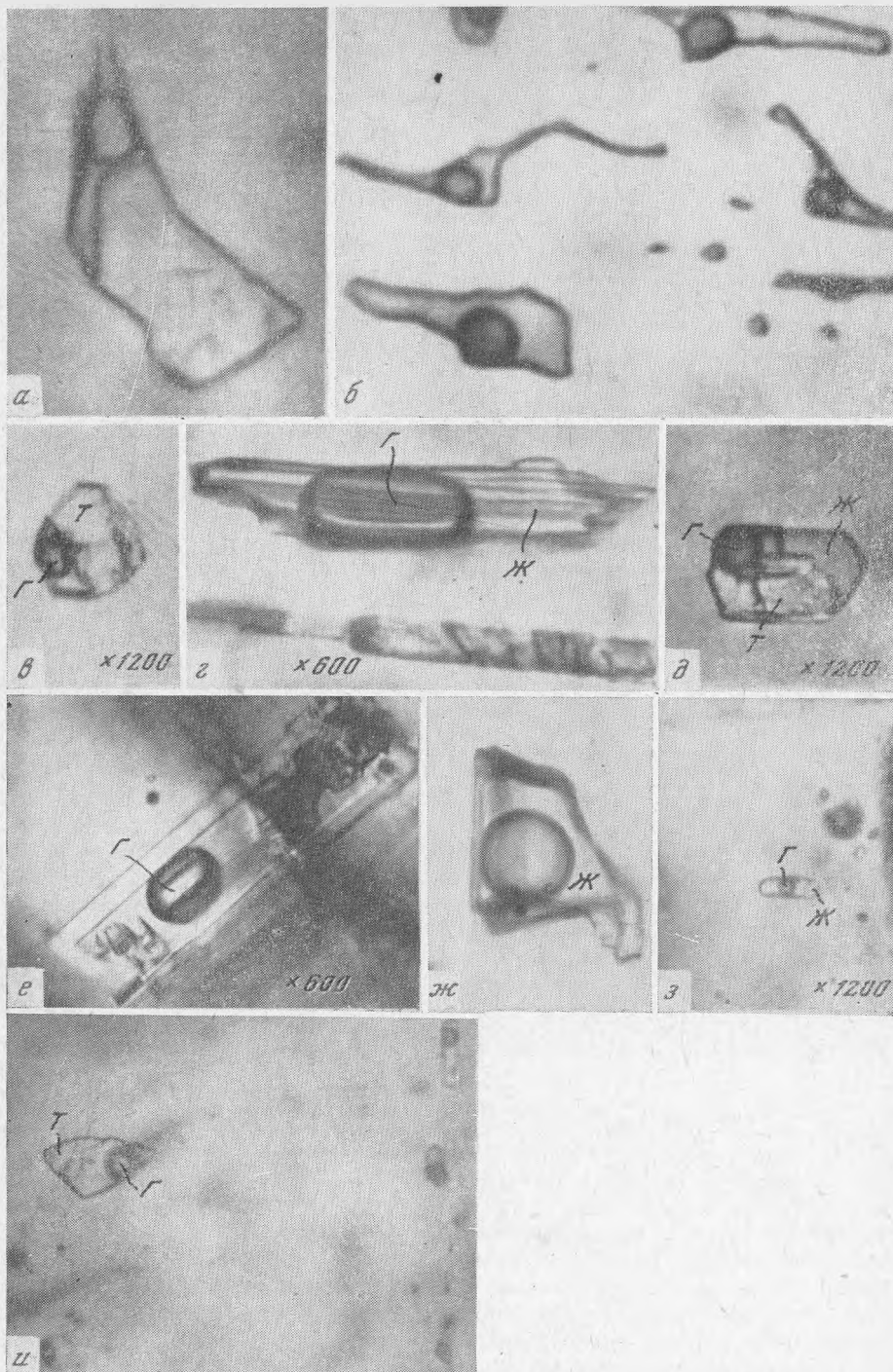


Рис. 12. Включения минералообразующей среды в вакуолях турмалина разного генезиса

г — газовая фаза; ж — жидкая фаза; т — твердая фаза; а, б — месторождение Завитая; увел. 1200; в—д — месторождение Малая Кулинда, увел. 1200; е, ж — месторождение Костречиха, увел. 600; з, и — месторождение Шерловая Гора, увел. 600 и 1200

В турмалинах из месторождений касситерит-кварцевой формации (пятая генетическая группа) преобладают вторичные газопо-жидкие включения, расположенные по трещинам в трех направлениях. Особенно много их в турмалине из месторождения Зун-Ундур. Включения очень мелкие, неправильной (овальной, округлой или треугольной) формы. Газовый пузырек в них занимает не более 30% объема вакуоли. В более редких первичных включениях, имеющих негативную форму кристалла турмалина, треугольную, каплевидную, газовая фаза занимает от 40 до 60% объема вакуоли. Эти включения имеют ориентированное направление в зонах роста кристаллов турмалина.

Еще мельче вакуоли в турмалинах из месторождений касситерит-кварц-сульфидной формации. Форма и расположение их в кристаллах также разнообразны (рис. 12, з, и). В основном они двухфазовые. Пузырек газа занимает в них не более 20—25% объема вакуоли.

В некоторых вакуолях турмалина из месторождений Зун-Ундур, Ушмун и Шерловая Гора был определен химический состав осадков (табл. 2, рис. 13).

Несмотря на ограничения возможностей метода (Доломанова и др., 1974) и сравнительно небольшого количества изученных вакуолей, в составе минералообразующей среды удалось определить 21 элемент. Таким образом, неоднородность состава турмалина обусловлена еще и присутствием в нем включений минералообразующей среды сложного состава. Она

Таблица 2

Химический состав осадков в вакуолях турмалина по данным рентгеноспектрального микроанализа

Номер образца вакуоли	Месторождение	Элементы		Предполагаемый минеральный состав осадков	
		обнаруженные в осадках, заключенных в вакуолях	не обнаружены		
398/1	Зун-Ундур	Ti, Fe, Mn, Gr, Sn, Pb, Cd, Ag, Bi, Si, Al, Mg, Ca, Na, K, Cl, S, P (рис. 13)	As, Se, Te, Sb, In, Hg, W, Zn, Co, Ni, Cu, V	Ag ₂ S, CdS, Al ₂ O ₃ , SnO ₂ , PbS, Bi ₂ S ₃ , фосфаты Na, K, Mg и др.	
398/2		Te, Fe, Mn (мало) (рис. 13)		(Fe, Mn) TiO ₃	
398/3		Sn, Bi, Pb, Cd			
398/4		Sn, Bi, Pb, Cu, K, S, Cl	Ag, Cd, Ca, Na, P	CuS, KCl	
398/5		Pb, Ca, Na, Cl	Bi, Cd, K, P	NaCl	
327/1	Ушмун	Ca, S	Bi, Pb, As, Cd	CaSO ₄	
411/1		Fe, Co, Ca, K, Na, Cl, S	Sn, Ti, Zn, Pb, Cu, Bi, Mo, W, Cd, Ni, Cr, Sr, Mn, As, N, P	KCl, Na ₂ SO ₄ , NaCl	
92/1		Mn, Na, K, Mg, P			
2032/1		Шерловая Гора	Zn, Sn		
1223/1			Ti, Fe, Mn, Sn, Zn, Si, Al, Mg, Ca, Na		NaCl, CaCl ₂
795/1	Ti, Ca, Na, Cl				
795/2	Ti, Fe, Sn, Ca	Ag, Pb, As, Bi, Zn, Cu, Co, Ni, V, Mo, W, Se, Sr, K, P, Cl, S			
795/4	Sn, Ca, K, Na, Cl, S	Ti, Bi, Pb, Cr, Ni, As, P	KSn..., SnS...		
795/3	Ti, Co, Ca, Na, Cl, S	Sn, Ag, Cd, Pb, Zn, Cu, Mn, Ni, Mo, V, Sr, Ba, K, P	Na ₂ SO ₄ , KCl, NaCl, NaCl		

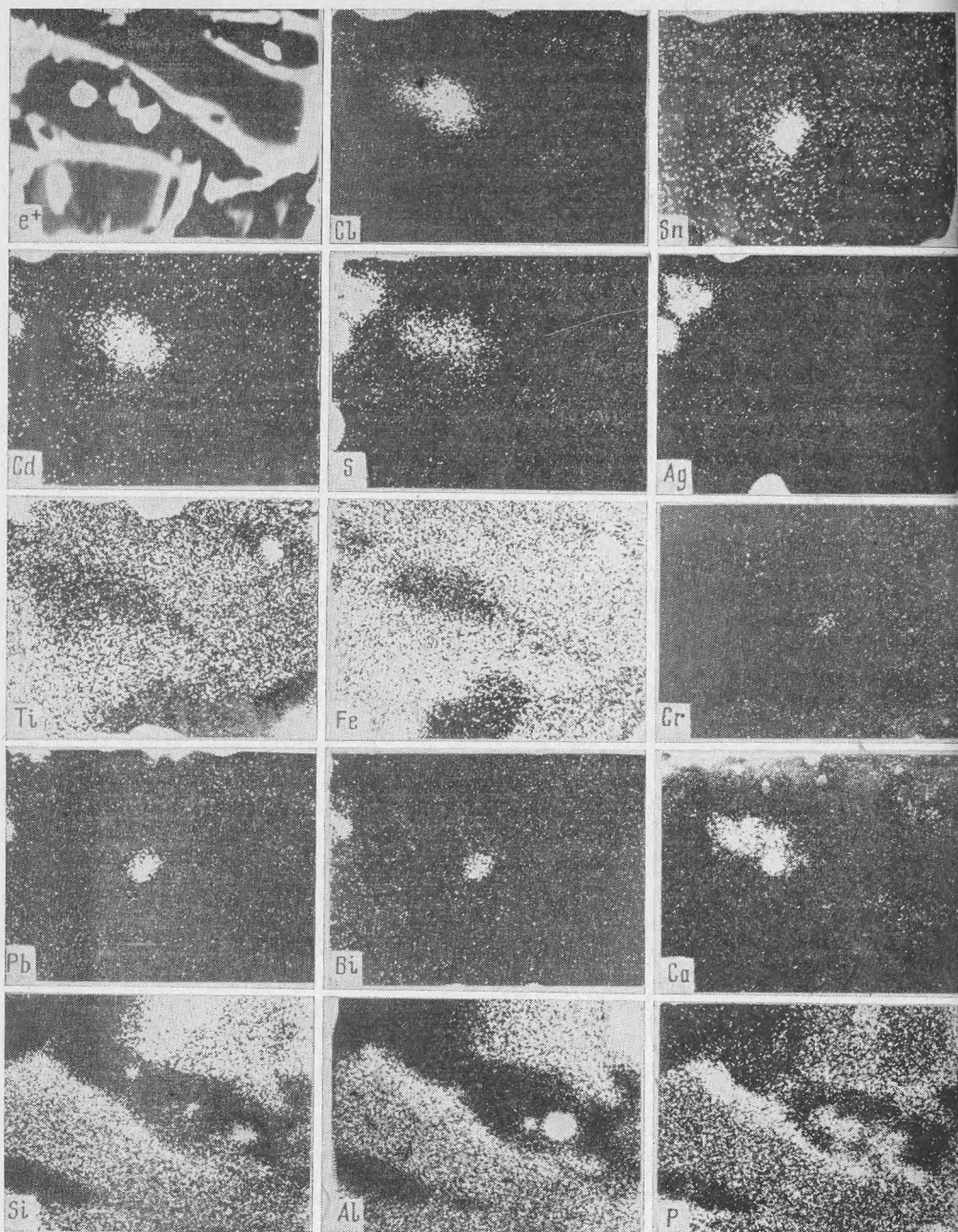


Рис. 13. Химический состав осадков в вакуолях турмалина (обр. 398) из месторождения Зун-Ундур.

Растровое изображение вакуолей в поглощенных электронах — e^+ ; в рентгеновском излучении — $P K_{\alpha}$, $Si K_{\alpha}$, $Al K_{\alpha}$, $Ca K_{\alpha}$, $Cd L_{\alpha}$, $S K_{\alpha}$, $Ag K_{\alpha}$, $Cl K_{\alpha}$, $Sn K_{\alpha}$, $Ti K_{\alpha}$, $Fe K_{\alpha}$, $Pb L_{\alpha}$, $Bi L_{\alpha}$, $Cr K_{\alpha}$.

усугубляется также неравномерным распределением вакуолей в кристаллах турмалина.

Состав турмалина по данным химического анализа. Из различных оловорудных месторождений Забайкалья было сделано 17 анализов турмалина (табл. 3). Остальные привлечены со сравнительной целью. Из них чистые турмалины из месторождений Баймурза и Зун-Ундур послужили для

эксперимента, а серо-белый турмалин, привезенный нами в 1937 г. из Пионерского месторождения (Урал), был эталоном дравита. В месторождениях касситерит-кварц-сульфидной формации турмалин, как правило, тонкоигольчатый, мелкий и обычно так сростается с кварцем и сульфидами, что его трудно бывает выделить чистым для анализа.

Для отделения турмалина от упомянутых минералов решено было пробу поместить в плавиковую кислоту и в смесь кислот $\text{HF} + \text{H}_2\text{SO}_4$. Чтобы убедиться в том, что турмалин в этих кислотах не растворяется и состав его не меняется, чистый турмалин поочередно помещался в 40% HF на 30 и 48 часов и на столько же в $\text{HF} + \text{H}_2\text{SO}_4$. За это время кварц с сульфидами должны были раствориться полностью, в чем мы убедились на примере пробы из Ушмунского месторождения. Затем турмалин промывали водой и анализировали. Химические анализы турмалина из месторождений Баймурза и Зун-Ундур, обработанного и не обработанного кислотами, а также удельный вес его оказались почти одинаковыми (табл. 3), т. е. обработка кислотами практически не влияла на его химический состав.

Пересчет химических анализов турмалина на формулы по методу И. Д. Борнеман-Старынкевич (1964) показал, что подавляющее большинство анализов на принятую в настоящее время формулу рассчитывается с трудом (табл. 4). Во всех анализах не хватает группы элементов, объединенных в X, и почти во всех анализах наблюдается избыток (ОН, F)-группы. Это наводит на мысль (по аналогии, со слюдой) (Звягин и др. 1965), что вода и фтор входят частично каким-то образом в группировку X. Кроме того, в 16 случаях из 22 наблюдается избыток алюминия и в 15 случаях — недостаток кремния. Количество этих элементов и бора, которого также либо недостает, либо он присутствует в избыточном количестве (13 случаев, из 22), не укладывается в формулу. Поэтому без достаточных оснований приходится допускать возможность изоморфного замещения, например, бора алюминием, кремнием и иногда титаном, а кремния — титаном и алюминием.

Причин этого явления может быть несколько. А именно:

1. Несовершенство химического анализа.
2. Весьма неоднородный состав и строение кристаллов турмалина, как это показано выше, поэтому существует много возможностей для включений в него минералов и элементов-примесей.
3. Окисление Fe^{2+} в Fe^{3+} при дроблении и растирании турмалина на анализ, как это отмечалось для хлорита (Вальяшихина и др., 1975) и слюд (Доломанова и др., 1974).
4. Не ясна валентность титана и его положение в решетке турмалина. Следует лишь отметить, что на основании рентгеноспектрального микроанализа можно заключить, что титан присутствует как в виде изоморфной примеси, так и в виде включений собственных микроминералов.
5. Не ясно, существует ли изоморфизм между алюминием, кремнием и особенно между ними и бором. Случаи, когда приходится привлекать их как изоморфные, чтобы удовлетворить формулу, довольно редки и, может быть, правильнее объяснить их избыток или недостаток ошибками анализа. По-видимому, химические методы определения алюминия, кремния и бора при анализе турмалинов недостаточно точны.
6. Лучше всего рассчитывается группа U_3 . Мелкие погрешности, которые наблюдаются здесь, также, вероятно, связаны с неточным определением некоторых элементов (например, железо) химическим анализом.

Для более точного определения химического состава турмалина следует применить не один, а ряд методов, в том числе ядерных. Тем не менее из рассмотрения табл. 4 можно заключить, что более высокотемпературные турмалины пегматитового и гидротермального генезиса по составу отвечают шерлам, хотя турмалины, образовавшиеся в месторождениях, залегающих в песчано-сланцевых породах, как правило, содержат больше

Таблица 3 (окончание)

Образец	Месторождение	ZrO ₂	Сумма	Fe ₂ O ₃	Сумма	Удельный вес	Аналитик
Анализ М. М. Сливко	Забайкалье	—	99,32	0,19	99,13	—	—
1	Малая Кулинда	—	99,42	0,14	99,28	3,189	Ю. С. Нестерова,
1	Ингодинское	—	100,64	0,52	100,12	3,201	Г. А. Арапова
1	Костречихинское	—	99,83	—	—	3,204	В. П. Острогорская
3126	Адун-Чолон	—	101,02	0,47	100,61	3,210	Т. М. Митюшина В. М. Некрасова
187		—	100,25	0,28	99,97	3,03	И. М. Бендер
310	Зун-Ундур	—	100,43	0,44	99,96 **	3,208	В. П. Острогорская
310 ^a	Там же (протравлен HF+H ₂ SO ₄)	—	100,20	0,40	99,80	2,208	
438	Ушмунское (протравлен HF)	—	100,09	0,39	99,68 ***	3,161	
34	Ононское	0,15	100,65	0,25	100,40	3,130	Т. М. Митюшина
91	Шерловая Гора (из грейзена)	—	100,08	0,17	99,91	3,170	
71	Шерловая Гора, IV стадия	—	99,59	0,09	99,50	2,98	И. М. Бендер
71 ^a		—	100,83	0,22	100,61	3,160	В. М. Некрасова
1314		—	100,33	0,09	100,24	3,175	Т. М. Митюшина
97	Шерловая Гора, V стадия	—	100,24	0,22	100,02	3,090	
744		—	99,78	0,27	99,51	3,160	
14	Комсомольское	—	100,19	0,23	99,96	3,183	И. Б. Никитина
42	Тарбальджей	—	100,21	0,38	99,83	3,02	
383	Баймурзинское (Каззахстан)	—	99,94	0,15	99,79	3,169	В. П. Острогорская
383 ^a	Там же (протравлен HF)	—	99,82	0,13	99,69	3,169	
11	Аргентина, Боливия	—	100,07	0,09	99,98	3,11	И. Б. Никитина
58 102	Пионерский рудник, Урал	—	99,58	0,11	99,47	3,025	

* Знак «—» означает «Не определялись». Суммы даны с учетом Li. ** Без хлора (Cl=0,03). Cl=0,02.

магния, чем образовавшиеся в месторождениях, залегающих в гранитах (табл. 5). Наблюдаемая зависимость химического состава турмалинов от состава вмещающих пород отмечалась и ранее многими исследователями. Турмалины из месторождений касситерит-кварц-сульфидной формации по составу можно отнести к шерло-дравитам. Но и среди них турмалины, образованные в кислых изверженных породах, более богаты железом, а образованные в песчанико-сланцевых — магнием. От высоко- к низкотемпературным месторождениям наблюдается тенденция увеличения воды и уменьшения фтора в турмалинах.

В отдельных месторождениях (Шерловая Гора), где турмалин кристаллизуется неоднократно, можно проследить изменение его состава по стадиям минерализации. В этом случае также от первой стадии к последней наблюдается увеличение магния в составе турмалина. Обращает на себя внимание и то, что по соотношению железа и магния выделяются шерлы из пегматитовых жил месторождений Завитая и грейзенов (по гранитам) Шерловой Горы (обр. 91) при более или менее близких содержаниях других компонентов. Высокое содержание закисного железа характерно для многих минералов, слагающих рудные тела, залегающие в гранитах Шерловой Горы (лепидомелан, сидерофиллит, ферберит, турмалин). Это указывает на особые условия их формирования и влияние этих

условий на характер последующих стадий минерализации и связанных с ними жильных и штокверковых рудных тел (Доломанова, 1963). Турмалины, образовавшиеся среди песчанико-сланцевых пород, обычно богаче магнием, кальцием, титаном и беднее закисным железом. Для окончательного суждения о влиянии условий образования на состав турмалина необходимы статистические данные и более широкий охват разнообразных его месторождений. На примере оловорудных месторождений Забайкалья, содержащих турмалин, типоморфизм его проявляется отчетливо.

Физические свойства турмалина. Оптические свойства. Показатели преломления турмалинов определялись контрастно-фазовым иммерсионным методом темного поля с применением центрального фокального экранирования (Черкасов, 1957). Применение этого метода обусловлено необходимостью изучения объекта с весьма изменчивыми свойствами (изоморфизм и зональность турмалинов). Метод основан на наблюдении в темном поле цветного эффекта, возникающего при экранировании лучей, прошедших через объект без преломления, контрастно-фазовым устройством КФ-4. Точность метода измерения $\pm 0,002$. Применение указанного метода для определения показателей преломления турмалинов дает возможность вести одновременно наблюдения на большом количестве зерен, видимых в поле зрения микроскопа. Если каждую пробу турмалина, состоящую из неоднородных по оптическим свойствам зерен, рассматривать как статистическую совокупность зерен переменного химического состава, находящуюся в некотором интервале дравит-шерлового изоморфного ряда, то показатели преломления отдельных зерен должны непрерывно изменяться от некоторых минимальных значений до максимальных. В таком случае наиболее четко определяемые показатели преломления $N_{0_{\max}}$ и $N_{0_{\min}}$ будут условно характеризовать диапазон изменения химического состава зерен в данной пробе. Величина $N_{0_{\max}} + N_{0_{\min}} / 2 = \bar{N}_0$ будет условно отвечать усредненному показателю преломления, соответствующему среднему химическому составу турмалина (табл. 6). Разность $N_{0_{\max}} - N_{0_{\min}}$ показывает величину дупреломления.

Так как турмалин оптически одноосный, отрицательный, то при указанном выше способе определения показателей преломления величина $N_{e_{\max}}$ четко не фиксируется, так как она перекрывается промежуточными значениями N_0 поскольку химический состав турмалина сложен (табл. 3) и на показатель преломления может влиять не одно железо, но и другие элементы, то прямой корреляции между содержанием железа и величиной показателей преломления нет. Однако следует отметить, что железо влияет на показатель преломления довольно сильно. Это выявляется при сравнении оптических свойств шерлов из месторождений Забайкалья и эталонного дравита с очень малым количеством железа. У дравита показатели преломления и дупреломления оказались значительно ниже, чем у шерлов. Содержание железа в нем почти в 4 раза меньше, чем у шерло-дравита с более низким содержанием железа (Тарбальджей). В пределах одного месторождения, если турмалин образует несколько генераций, то величина показателей преломления уменьшается от ранних генераций турмалина к поздним (Адун-Чолон, Шерловая Гора).

Строение турмалина по данным электронной микроскопии. Изучение турмалинов из разных месторождений показало, что, кроме чистых и однородных участков, наблюдаются места с тонкими эмульсиевидными выделениями неизвестного минерала, неравномерно распределенного по различным плоскостям скола. Под электронным микроскопом видна также неоднородность строения некоторых кристаллов. Они состоят из группы закономерно сросшихся ультрамелких индивидуумов, местами разобценных турмалином же с сетчатым строением. Внешние зоны таких сложных кристаллов однородны и объединяют в один общий кристалл весь

Таблица 4
Состав турмалина по данным химического анализа **

Образец	Месторождение	X				Y ₁						Z ₆	
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Σ	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Al ³⁺	Σ	Al ³⁺	Σ***
Анализ М. М. Сливко	Забайкалье	0,453	0,064	0,116	0,633	0,064	1,757	0,637	0,138	—	3,132	6,249	6,208
1	Малая Кулунда	0,332	0,000	0,010	0,342	0,246	1,770	0,254	0,014	0,716	3,00	7,222	6,506
1	Ингодинское	0,658	0,031	0,00	0,689	0,184	2,143	0,113	0,009	0,531	3,00	6,767	6,209
1	Костречихинское	0,705	0,023	0,036	0,764	0,357	2,058	0,033	0,036	0,450	3,00	6,582	6,132
3126	Адун-Чолон	0,543	0,015	0,00	0,558	0,204	2,298	0,067	0,051	0,431	3,00	6,595	6,164
187		0,762	0,105	0,016	0,883	0,00	2,243	0,00	0,027	0,730	3,00	6,806	6,076
310	Зун-Ундур	0,628	0,039	0,00	0,667	0,208	2,128	0,010	0,066	0,542	3,00	6,671	6,129
310 ^a	Там же (протравлен HF + H ₂ SO ₄)	0,653	0,010	0,00	0,663	0,236	2,150	0,010	0,067	0,498	3,00	6,739	6,241
138	Ушмун	0,635	0,018	0,00	0,653	0,631	1,839	0,00	0,040	0,465	3,00	6,781	6,284
34	Ононское	0,765	0,008	0,250	0,933	1,348	1,378	0,071	0,012	0,134	2,955	6,134	6,00 ₅
91	Шерловая Гора	0,767	0,017	0,00	0,784	0,411	2,639	0,168	0,022	0,010	3,00	6,146	6,092
71		0,920	0,123	0,297	1,340	0,982	1,666	0,103	0,002	0,063	2,816	6,063	6,00
71 ^a		0,443	0,014	0,295	0,752	1,228	1,370	0,527	0,00	—	3,125	5,948	5,948
1314		0,605	0,006	0,299	0,910	1,310	1,791	0,162	0,007	—	3,270	5,851	5,851
97		0,644	0,010	0,227	0,881	1,350	1,530	0,552	0,015	—	3,449	5,661	5,661
744		0,472	0,016	0,179	0,667	1,719	1,053	0,074	0,018	0,131	3,00	6,426	6,295
14	Комсомольское	0,622	0,008	0,037	0,667	0,971	1,843	0,040	0,014	0,132	3,00	6,997	6,331
42	Тарбальджей	0,578	0,002	0,399	0,979	2,335	0,727	0,090	0,00	—	3,152	6,132	6,00 ^e
383	Баймурзинское (Казахстан)	0,550	0,023	0,052	0,625	0,702	1,665	0,010	0,039	0,568	3,00	6,763	6,195
383 ^a	Там же (протравлен HF)	0,536	0,020	0,042	0,598	0,719	1,654	0,012	0,039	0,560	3,00	6,779	6,219
11	Аргентина, Боливия	0,717	—	0,232	0,949	1,548	1,413	0,00	0,00	—	2,961	5,498	5,498
58 102	Пионерское, Урал	0,544	0,013	0,173	0,730	2,594	0,164	0,070	Следы	0,172	3,00	6,509	6,241

Т1. ** Знак «—» означает «Нет». Знак > — избыток, < — недостаток. *** Суммы с учетом Z1

агрегат (рис. 14 а, б). По-видимому, нечто подобное иногда бывает видно и под оптическим микроскопом (рис. 15). На сколах других, еще более мелких кристаллов, можно видеть игольчатые кристаллы. Они расположены часто в виде коротких спиралей поодиночке или парами. Кроме них, в турмалине встречаются и ультрамелкие вакуоли. Несомненно, что подобная неоднородность строения турмалинов ощутимо сказывается на их физических свойствах.

Особенности строения турмалинов по данным ИК-спектров поглощения. ИК-спектры шерлов и шерло-дравитов были получены на приборе UR-10 в диапазоне частот 3700—3200 см⁻¹ и 1700—400 см⁻¹. Все спектры турмалинов, изученных нами, характеризуются интенсивными, четко разделенными полосами с рядом добавочных максимумов в интервале частот 1400—1150, 1150—900 см⁻¹ и группой полос средней интенсивности 800 — 650 и 650 — 400 см⁻¹ (рис. 18).

B ₃				Si ₁₆				O ₂₇	(OH, F, Cl) ₄				Примечание ***
B ³⁺	c		Σ	Si ⁴⁺	c				OH ⁻	F ⁻	Cl ⁻	Σ	
	Si ⁴⁺	Al ³⁺			Al ³⁺	Ti	Σ						
2,959	—	0,041	3,00	6,007	—	0,017	6,024	27,836	2,919	0,245	—	3,164	> Al < B, (OH, F)
3,105	—	—	3,105	6,020	—	0,026	6,046	29,31	1,51	0,180	—	1,69	> Al, Si, (OH, F)
3,100	—	—	3,100	5,915	0,027	0,058	6,00	28,213	2,090	0,686	0,011	2,787	> Al, B, (OH, F)
3,094	—	—	3,094	5,893	—	0,115	6,008	27,927	3,073	—	—	3,073	> Al, B, (OH, F) < Si
3,242	—	—	3,242	5,908	—	0,078	5,986	28,320	2,144	0,536	—	2,680	> Al, B, (OH, F) < Si
2,719	0,276	—	2,995	6,276	—	—	6,00	28,306	2,342	0,352	—	2,694	> Al, Si, (OH, F) < B
3,158	—	—	3,158	5,975	—	0,069	6,044	28,210	2,181	0,572	0,037	2,790	> Al, B, (OH, F) < Si
3,025	—	—	3,025	6,008	—	0,061	6,069	28,206	2,266	0,528	0,012	2,794	> Al, B, (OH, F)
2,968	—	0,032	3,00	6,013	—	0,047	6,060	28,185	2,285	0,504	0,026	2,815	> Al, (OH, F) < B
3,030	—	—	3,030	5,982	—	0,097	6,079	27,692	2,993	0,315	0,00	3,308	> B, (OH, F) < Si
3,123	—	—	3,123	5,929	0,044	0,027	6,00	27,563	3,216	0,221	Следы	3,437	> Al, B, (OH, F) < Si
2,632	0,117	0,094 *	2,843	6,117	—	0,094	6,00	27,175	3,712	0,113	—	3,825	> Si, (OH, F), щелочи < B
3,215	—	—	3,215	5,838	—	0,121	5,959	28,149	2,573	0,278	—	2,851	> B, (OH, F), Y ₃ < Si, Al
2,981	—	—	2,981	5,900	—	0,086	5,986	27,351	3,531	0,118	Следы	3,649	> (OH, F), Y ₃ < Al, Si, B
3,110	—	—	3,110	5,837	—	0,057	5,894	27,454	3,264	0,282	0,00	3,546	> B, Y ₃ < Al, Si, (OH, F)
3,403	—	—	3,403	5,625	—	0,008	5,633	27,894	2,767	0,339	0,00	3,106	> Al, B, (OH, F) < Si
2,651	—	0,349	3,00	5,761	0,185	0,054	6,00	27,684	3,063	0,253	—	3,316	> Al, (OH, F) < Si, B
2,702	—	0,132	2,834	5,903	—	0,133	6,036	27,418	3,163	0,419	—	3,582	> Al, (OH, F), Y ₃ < Si, B
3,050	—	—	3,050	6,037	—	0,091	6,128	28,486	2,320	0,194	0,00	2,514	> Al, Si, B, (OH, F)
3,048	—	—	3,048	6,042	—	0,091	6,133	28,529	2,299	0,172	0,00	2,471	> Al, Si, B, (OH, F)
3,405	—	—	3,405	6,115	—	0,072	6,187	27,560	3,331	0,109	0,00	3,440	> Si, B < Al, (OH, F)
2,904	—	0,096	3,00	6,025	—	Следы	6,025	27,968	2,896	0,136	0,00	3,032	> Al, Si < B, (OH, F)

В области 3700–3200 см⁻¹ в ИК-спектрах шерлов и шерло-дравитов наблюдаются весьма слабые максимумы 3570 и 3480–3500 см⁻¹. Как было показано ранее (Некрасов, Зиборова, 1974), максимум 3570 см⁻¹ отвечает валентным колебаниям OH-групп, связанных с Mg или Fe²⁺, максимум 3480–3500 см⁻¹ — OH-группам, связанным с Al. Поскольку максимум 3480–3500 см⁻¹ из всех гидроксильных полос наиболее низкочастотный, то, сопоставляя его с наикратчайшим расстоянием в структуре турмалина Me—OH 2·01 Å (Ito, Sadanaga, 1951), можно утверждать, что частота ~3500 см⁻¹ характеризует колебания OH-групп, расположенных в вершинах Al-октаэдров Y-позиций. Сопоставление содержания Al в Y-позициях (по данным табл. 4) с появлением максимума 3480–3500 см⁻¹ подтверждает это. Исключение составляет обр. 1 из месторождения Костречица, в котором Al_Y = 0,451.

Полоса 1400–1150 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям ν₃ бо-

Таблица 5

Соотношение содержаний Fe и Mg в турмалинах в зависимости от генезиса и состава вмещающих пород

Образец	Месторождение	Отношение молекулярных количеств FeO + Fe ₂ O ₃ /MgO	Породы, вмещающие турмалин	Примечание
Анализ М. М. Сливко	Забайкалье	32,2	Песчанико-сланцевые	Пегматитовые жилы
1	Малая Кулинда	8; 10 *	Песчанико-сланцевые	
1	Ингодинское	12	Граниты	Пегматоидное обособление в граните
1	Костречихинское	5,8	Песчанико-сланцевые	
3126	Адун-Чолон	11,4	Граниты	Из гидротермальных жил, секущих пегматитовые
310	Зун-Ундур	10,2	Граниты	
138	Ушмунское	2,75	Песчанико-сланцевые	Касситерит-кварцевая формация
34	Оюнсское	1,05	Песчанико-сланцевые	
91	Шерловая гора	25,0	Грейзены по граниту	Касситерит-кварц-сульфидная формация
71		1,7	IV стадия	
71 ^a		1,3	минерализации *	
1314		1,4		
97		1,3	V стадия	
744		0,6	минерализации	
14		Комсомольское	1,9	
42	Тарбальджей	0,3		
11	Аргентина, Боливия	1,0		
58 102 дравит	Пионерское, Урал	0,07		

* Несколько анализов турмалина из разных участков.

рокислородных связей в борном треугольнике структуры турмалина. При этом расщепление полосы, равное для шерлов $\sim 60 \text{ см}^{-1}$ ($1270-1330 \text{ см}^{-1}$), увеличивается для шерло-дравитов до 90 см^{-1} ($1260-1350 \text{ см}^{-1}$). Пик 720 см^{-1} отвечает внеплоскостным деформационным колебаниям $\delta B-O$.

Основная широкая полоса поглощения $1150-900 \text{ см}^{-1}$ в спектрах шерлов и шерло-дравитов содержит, как правило, три максимума: $980, 1030, 1100 \text{ см}^{-1}$, из которых 980 см^{-1} — более интенсивный, чем остальные. Согласно данным А. Н. Лазарева (1968), эти три максимума и полоса 780 см^{-1} характеризуют симметричные и антисимметричные валентные колебания связей $Si-O-Si$ и $O^- - Si - O^-$ тетраэдров кольца Si_6O_{18} : $780 - \nu_s SiOSi$, $980 - \nu_s OSiO$, $1030 - \gamma_{as} O^- - SiO^-$, $1100 - \gamma_{as} SiOSi$. Среди исследованных нами турмалинов обнаружено два типа спектров в интервале основных частот $780-1100 \text{ см}^{-1}$. Первый — преобладающий тип спектров, описанный выше. Второй тип — спектры обр. 744, 244 и отчасти 14 (см. табл. 4). Наиболее показателен из них спектр шерло-дравита пятой генерации из месторождения Шерловая Гора, обр. 744. Он характеризуется относительно простой формой полосы $980-1100 \text{ см}^{-1}$ с интенсивным максимумом на 1030 см^{-1} . Максимумы 980 и особенно 1100 см^{-1} слабо намечены. Наряду с этим $\gamma_s SiOSi$ 780 четко расщеплена на две компоненты: 760 и 780 см^{-1} . Известно (Лазарев, 1968), что расщепление $\nu_s SiOSi$ может произойти вследствие нарушения плоскости

Таблица 6
Физические свойства турмалина *

Образец	Месторождение	Формация и тип месторождения	Генерация	Светопреломление и дупреломление					Диэлектрическая проницаемость, ϵ	Удельная магнитная восприимчивость, $\chi \cdot 10^{-5}$ CGSM	Плотность, d	J_{560}/J_{585}	Молекулярные количества			
				$N_{e\min}$	$N_{o\min}$	$N_{o\max}$	$N_{o\min} - N_{e\min}$	N_o					FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO
1	Малая Кулинда	Пегматитовая,	I	1,624	1,647	1,653	0,023	1,650	6,40	20,8	3,189	1,22	1652	121	235	14
92	Ушмунское	Пегматондный	I	1,625	1,652	1,662	0,027	1,657	—	—	—	—	—	—	—	—
1	Ингодинское		I	1,627	1,650	1,660	0,023	1,655	6,88	21,6	3,201	1,30	2071	55	178	9
3126	Адун-Чолон	Гидротермальный, в пегматитовых телах	I	1,625	1,654	1,663	0,029	1,658	7,02	23,6	3,210	1,25	2209	32	196	49
3152			II	1,622	1,649	1,658	0,027	1,654	—	26,7	3,030	—	—	—	—	—
1	Костречихинское	Касситерит-полевошпат-кварцевая	I	1,626	1,652	1,660	0,026	1,656	7,03	20,5	3,204	1,22	1986	16	345	35
310	Зун-Ундурское	Касситерит-кварцевая	I	1,624	1,654	1,661	0,030	1,658	7,01	21,7	3,208	1,25	2053	5	201	64
138	Ушмунское		I	1,622	1,648	1,657	0,026	1,653	7,35	18,3	3,161	1,15	1783	0,00	612	39
34	Ононское		I	1,621	1,644	1,658	0,023	1,651	6,78	14,6	3,130	1,07	1355	70	1326	12
1240	Будюмканское		I	1,621	1,645	1,657	0,024	1,654	6,81	9,78	—	—	—	—	—	—
14	Комсомольское	Касситерит-кварц-сульфидная	I	1,621	1,646	1,651	0,025	1,649	7,05	21,5	3,183	1,18	1760	19	927	14
42	Гарбальджейское	То же	I	1,620	1,648	1,656	0,028	1,653	—	—	3,020	—	722	45	2349	0,00
91	Шерловая Гора	То же (из грейзена)	I	1,630	1,656	1,673	0,026	1,664	7,45	28,4	3,170	1,33	2552	80	106	21
1314		То же	IV	1,622	1,651	1,665	0,029	1,658	7,69	20,7	3,020	1,20	1745	79	1277	7
97		(из штокверка)	V	1,623	1,647	1,653	0,024	1,650	7,73	18,7	3,090	1,10	1480	268	1304	15
744			V	1,619	—	1,645	0,026	—	6,45	—	3,090	1,09	1048	37	1711	18
59 102	Пионерское (Урал)	Гидротермальный, серо-белый		1,607	—	1,629	0,022	—	—	—	3,025	0,92	168	36	2659	Следы

* Знак «—» означает «Нет данных».

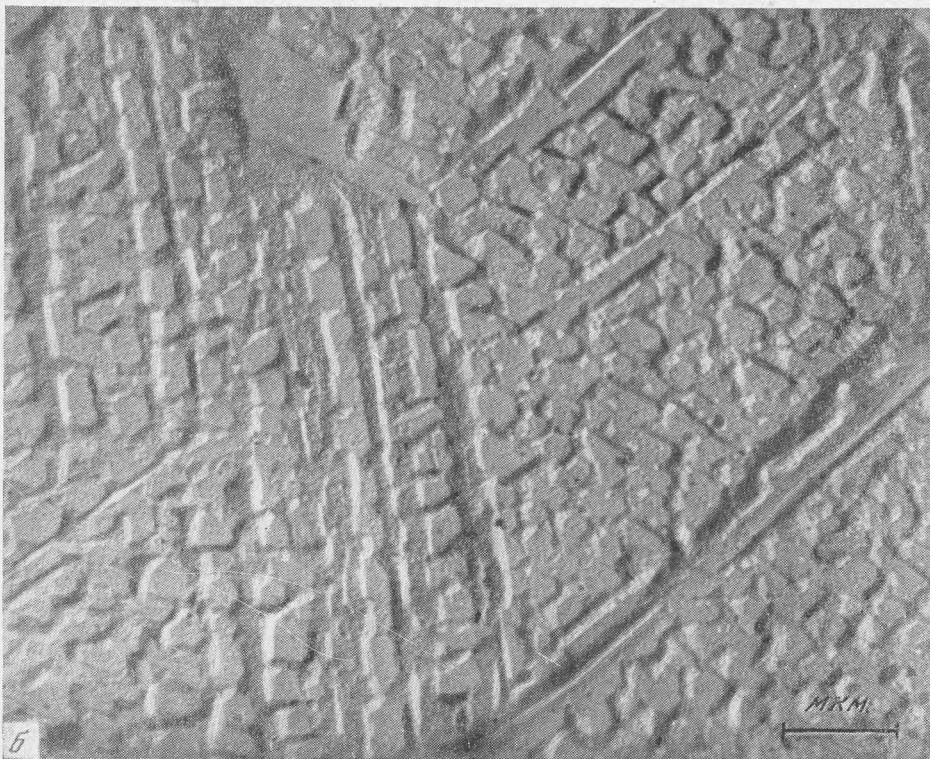


Рис. 14. Строение турмалина под электронным микроскопом. Месторождение Аду-Чолон

а — на сколе видно сложное строение кристаллов турмалина, сходное с рис. 6. Внутри — мелкие закономерно ориентированные кристаллы разделены каким-то веществом. Снаружи этот агрегат заключен в однородную зону турмалина. Угольно-желатиновая реплика, увел. 8000

б — деталь строения турмалина, увел. 15 000

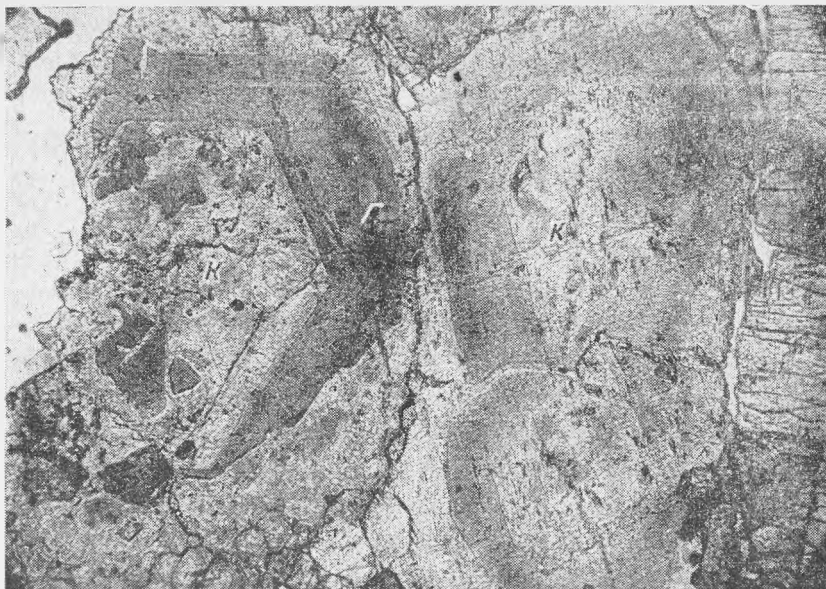


Рис. 15. Брекчиевидное строение кристаллов турмалина. Голубая (z) и коричневая (к) окраска внутри кристаллов. Месторождение Шерловая Гора, увел. 90, без анализатора

кольца Si_6O_{18} с уменьшением углов SiOSi и понижением локальной симметрии цикла Si_6O_{18} , как это реализуется в случае диоптаза. Нарушение же плоскостности цикла Si_6O_{18} в турмалине можно, по всей вероятности, объяснить изоморфным вхождением Al в тетраэдры кольца Si_6O_{18} , тем более, что и химические анализы (табл. 4) показывают недостаток кремния в этих турмалинах.

Обращает внимание появление в ряде спектров слабой, но достаточно четкой полосы 750 см^{-1} . Природа этой полосы пока неясна.

Спектры турмалинов касситерит-пегматитовой формации — типичные спектры шерлов. В области $3200\text{—}3600 \text{ см}^{-1}$ наряду с полосой 3570 см^{-1} обнаруживается четкий, обособленный в образце турмалина из месторождения Малая Кулинда максимум 3500 см^{-1} ($\text{Al}_y\text{—OH}$). Характерно присутствие полосы 750 см^{-1} .

Спектры турмалинов из пегматоидных обособлений в гранитах Ингодинского (обр. 1-Ин) и Ушмунского (обр. 92) месторождений весьма отличаются друг от друга в области валентных колебаний OH -группы. Спектр обр. 1-Ин в этой области вообще аномален по сравнению со всеми остальными изученными образцами прежде всего интенсивностью максимума 3570 см^{-1} . Компонента 3500 см^{-1} весьма четка. Заметные широкие полосы 3400 и 1650 см^{-1} свидетельствуют о вхождении молекулярной воды в этот минерал. В отличие от обр. 1-Ин, обр. 92 практически не содержит гидроксила. Оба спектра обнаруживают слабую полосу 750 см^{-1} .

Спектр турмалина из Костречихинского месторождения (обр. 1-Кс) касситерит-полевошпат-кварцевой формации несколько противоречит данным расчета химических анализов, показывающих значительное количество Al в Y -позициях, так как не содержит максимума 3500 см^{-1} . Полоса 750 см^{-1} также отсутствует.

Спектры турмалинов (обр. 310, 138, 138^a) из месторождений Зун-Ундурского и Ушмунского касситерит-кварцевой формации и из гидротермальных кварцевых жилек месторождения Адун-Чолон, секущих пегматиты (обр. 3126, 3152), в общем сходны со спектрами турмалинов касситерит-пегматитовой формации за исключением обр. 34 из Ононского

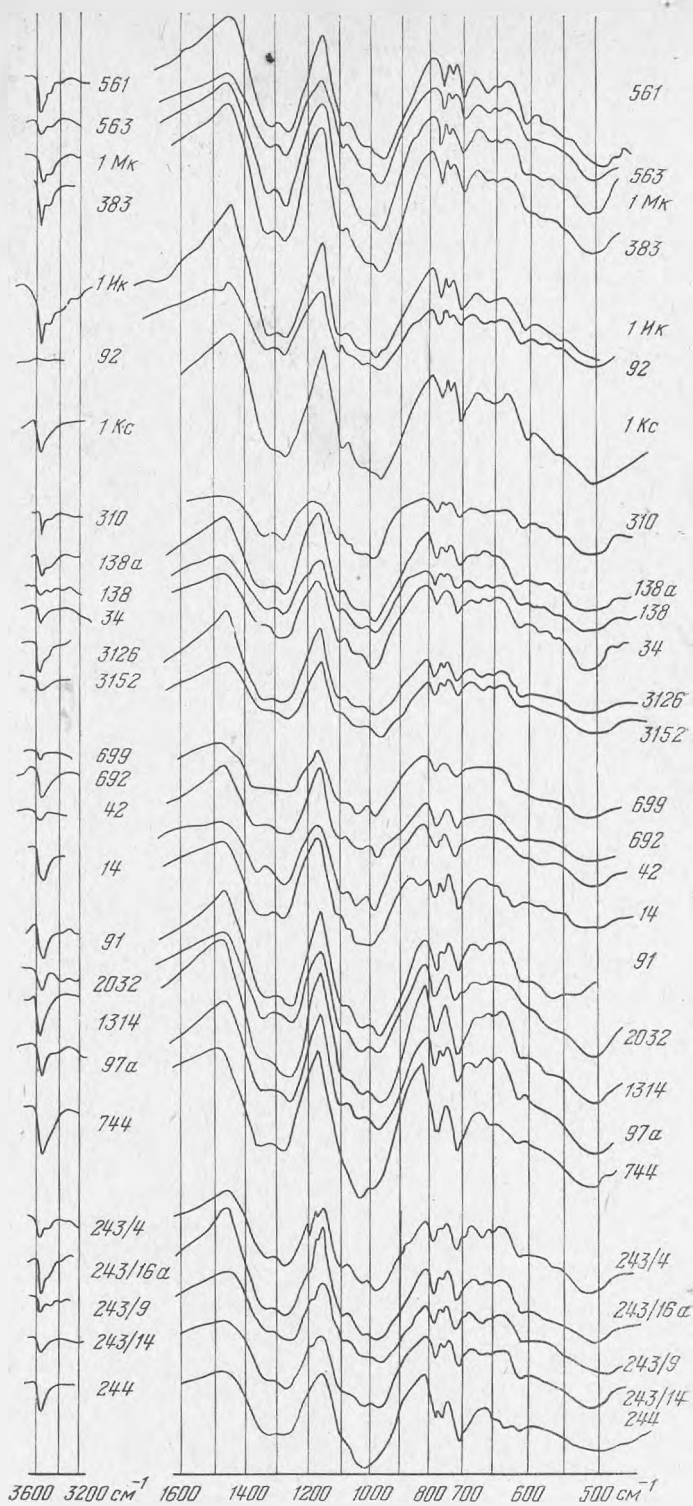


Рис. 16. Инфракрасные спектры поглощения турмалинов

месторождения, не обнаруживающего в своем спектре полосы Al_1 — OH 3500 см^{-1} . Полоса 750 см^{-1} также отсутствует в спектре обр. 34. Это объединяет спектры турмалинов обр. 1-Кс и 34 с описанными ниже турмалинами касситерит-кварц-сульфидной формации.

Спектры турмалинов из месторождений касситерит-кварц-сульфидной формации отличаются от предыдущих отсутствием максимума 3500 см^{-1} . Следовательно, Al в турмалинах этих месторождений практически не занимает Y -позиций, что хорошо согласуется с пересчетом химических анализов на кристаллохимические формулы в табл. 4. Наряду с этим анализ спектров турмалинов месторождения Телекай (Магаданская обл.)¹ показывает, что при определенных условиях (обр. 243/4, 243/16, 243/14) Al занимает обе октаэдрические позиции. Месторождение Телекай принадлежит к малосульфидной ветви месторождений упомянутой выше формации. Обособленно в этой группе стоят низкотемпературные разности турмалина месторождений Шерловая Гора (обр. 744), Телекай (обр. 244) и Комсомольское (обр. 14), где сульфиды играют существенную роль в составе руд, в которых, как было показано выше, предполагается вхождение Al в тетраэдры структурного кольца.

Итак, Al в структуре турмалина занимает две неэквивалентные октаэдрические позиции: Y (октаэдры структурного кольца $Al - OH \sim 2.01 - 2.04\text{ \AA}$) и Z (октаэдры, связывающие кольца Si_6O_{18} в плоскости, перпендикулярной оси третьего порядка $Al - OH \approx 2.25 - 2.66\text{ \AA}$). Возможно также изоморфное вхождение в кремнекислородные тетраэдры.

Изучение ИК-спектров турмалинов оловорудных месторождений выявило довольно интересное распределение Al в зависимости от генезиса месторождения и конкретных условий образования внутри его (месторождение Телекай). Так, в турмалинах касситерит-пегматитовой, касситерит-полевошпат-кварцевой и в турмалинах пегматоидных обособлений в гранитах Al занимает обе октаэдрические позиции. В турмалинах касситерит-кварц-сульфидной формации занятыми оказываются преимущественно позиции Z . В то же время в наиболее низкотемпературных турмалинах этой формации, в отличие от всех предыдущих, проявляется изоморфизм $Al - Si$, т. е. осуществляется реализация третьей возможной позиции Al .

Магнитная восприимчивость изучалась Н. В. Добровольской в лаборатории ВИМС. Измерения удельной магнитной восприимчивости χ проводились методом Фарадея на специальных магнитных весах чувствительностью $2 \cdot 10^{-4}$ г. Навеска минерала составляла 10—30 мг. Чувствительность метода достигает 10^{-9} CGSM.

Точность относительных измерений величины магнитной восприимчивости составляла $\pm 1\%$. Величина удельной магнитной восприимчивости выражается в единицах $n \cdot 10^{-6}$ $\text{см}^3/\text{г}$. Парамагнитные свойства турмалина определяются присутствием ионов железа. В составе турмалина иногда отмечаются и другие парамагнитные ионы (Mn^{2+} , Cr^{3+}), но так как их мало, то существенного влияния на магнитные свойства турмалина они не оказывают. Магнитная восприимчивость позволяет судить об относительном количестве, форме вхождения парамагнитных ионов в турмалин и указывает на отсутствие или, наоборот, присутствие включений ферримагнитных минералов. В изученных турмалинах не наблюдалась зависимость χ от напряженности магнитного поля H . Это свидетельствует об отсутствии в турмалинах включений магнитных минералов. Прямой зависимости величины магнитной восприимчивости от содержания железа не наблюдается. Можно лишь отметить, что при большей упорядоченности структуры турмалина величина χ колеблется менее ($20,7 - 23,6 \cdot 10^{-3}$ CGSM), чем в турмалинах с менее упорядоченной структурой ($14,6 - 20,5 \cdot 10^{-6}$; $18,3 - 28,4 \cdot 10^{-6}$ CGSM). Наибольшая величина χ оказалась у травяно-зеленого турмалина из грейзена Шерловой Горы. Он отличается

¹ Образец А. М. Подольского.

и наименьшей упорядоченностью структуры. Наименьшая величина χ отмечена у турмалинов Будюмканского и Ононского месторождений (табл. 6).

Диэлектрическая проницаемость (ϵ) турмалинов измерялась Г. А. Горбатовым на мелких осколках зерен размером 0,1—0,25 мм в лаборатории ВИМС. Измерения производились способом погружения на диэлькометре в стандартных условиях: при стабилизированной частоте 1 мГц, при температуре +25,0°C. Для каждого отдельного измерения бралась навеска в 15—20 мг (примерно 1000 зерен). Испытуемые навески погружались в смесь ксилола и изобутилового спирта. Погрешность измерения ϵ турмалина в большинстве случаев составляла $\pm 0,02$ —0,03. Лишь в редких случаях повторные определения ϵ одной и той же пробы различались на 0,1. Турмалин анизотропен в отношении диэлектрической проницаемости. При измерениях ϵ осколков зерен определяется величина $\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$. Диэлектрическая проницаемость — безразмерная величина (в абсолютной электростатической системе единиц). Прямой зависимости ϵ от содержания железа и других парамагнитных элементов-примесей нет, как и от степени упорядоченности структуры турмалина по данным ИКС. По-видимому, как и в случае с кварцем, диэлектрическая проницаемость зависит от совокупности свойств турмалина. Нарушение этой зависимости обусловлено еще и степенью дефектности кристаллов, которая, в частности, определяется количеством и распределением вакуолей в турмалине (табл. 6).

* * *

На оловорудных месторождениях Забайкалья гидротермального типа из всех разновидностей турмалина наиболее типичен шерл. В сводной работе Г. П. Барсанова и М. Е. Яковлевой (1965) справедливо отмечено, что для турмалина шерлового ряда необходимо выявить тонкий «геохимический» типоморфизм.

Типоморфизм турмалина проявляется в специфичности его химического состава, зависящего как от состава гидротермальных растворов, так и от состава пород, в которых он кристаллизуется. Изучение петрохимических свойств пород, представленных на месторождениях, указывает на то, что гранитные породы, с которыми генетически связаны месторождения, обогащены железом, о чем свидетельствует и состав триоктаэдрических слюд и других минералов в гранитоидах (Доломанова и др., 1974). Очевидно, гранитные магмы генерируют и гидротермы с повышенным количеством железа и нередко бора, что и отражается на составе не только турмалинов, но и других минералов. В пегматитах и месторождениях касситерит-кварцевой формации, образовавшихся в песчанико-сланцевых породах, турмалины содержат больше магния, чем те, которые кристаллизовались в гранитных породах. Турмалины из месторождений касситерит-кварц-сульфидной формации по составу можно отнести к шерло-дравитами. Но и среди них турмалины, образованные в кислых изверженных породах, богаче железом, а образованные в песчанико-сланцевых породах и порфиритах — магнием. Кроме того, наблюдается обогащение магнием турмалинов от более ранних к более поздним его генерациям в одном и том же месторождении.

Бор присутствовал в гидротермальных растворах, из которых образовались месторождения касситерит-полевошпат-кварцевой и касситерит-кварцевой формации, но в случае залегания месторождения в крупных интрузивах гранитоидов он в виде турмалина в составе руд фиксировался не повсеместно, а только при пересечении жилами ксенолитов песчанико-сланцевых пород кровли и дорудных даек порфирита. Особенно отчетливо осаждение бора в виде турмалина и влияние на этот процесс состава окружающей среды видно в тонких прожилках штокверков. В них нередко приходилось наблюдать образование турмалина только в том случае, если

прожилок пересекал полевые шпаты, топаз, т. е. минералы, богатые алюминием (Доломанова, 1959). Но, кроме алюминия, по-видимому, на кристаллизацию турмалина влияет и повышенное количество магния в окружающих породах. Так, например, на Ононском месторождении как турмалин, так и хлориты (Вальяшихина и др., 1975) из рудных жил, залегающих в метаморфических породах палеозойского возраста, богатых магнием содержат этот элемент в повышенном количестве. Все изложенное выше свидетельствует о заимствовании гидротермальными растворами части элементов из вмещающих пород.

Вероятно, концентрация алюминия в растворе влияет и на его распределение в структуре турмалина. Так, методом ИК-спектроскопии показано, что в турмалинах из высокотемпературных месторождений алюминий занимает обе октаэдрические позиции, а в месторождениях более низкотемпературных он сосредоточен преимущественно в позиции Y, а если проявляется изоморфизм Al — Si, то осуществляется реализация третьей возможной позиции алюминия.

Наблюдается тенденция уменьшения содержания фтора и увеличения количества воды от высоко- к низкотемпературным турмалинам. Эта тенденция в поведении воды присуща кварцу, слюдам и т. д.

Наблюдаемое тонкое зональное и мозаичное строение турмалинов и изменение их химического состава по зонам роста свидетельствуют о микрогетерогенности гидротермальных растворов и кристаллизации их в неравновесных условиях.

Изучение первичных газовой-жидких включений в турмалинах, содержащих гидротермальный раствор, показало, что объем газовой фазы больше в турмалинах ранних генераций и в высокотемпературных месторождениях, чем в турмалинах поздних генераций и в низкотемпературных месторождениях. В составе осадков на стенках вакуолей обычны хлориды и сульфаты или сульфиды многих элементов (табл. 2) и более редки фосфаты и окислы. Определение карбонатов затруднено условиями эксперимента. Перечень элементов, обнаруженных в осадках, отражает химический состав минералов, кристаллизующихся вместе с турмалином.

Олово почти всегда обнаруживается в турмалине спектральным анализом и очень часто в составе осадков в вакуолях.

Физические свойства турмалина, как и других минералов, обусловлены его химическим составом и особенностями строения.

ЛИТЕРАТУРА

- Барсанов Г. П., Яковлева М. Е. О турмалине шерлового состава.— Труды Минерал. музея им. А. Е. Ферсмана (АН СССР), вып. 16, 1965.
- Борнеман-Старынкевич И. Д. Руководство по расчету формул минералов. М., «Наука», 1964.
- Вальяшихина Е. П., Доломанова Е. И., Подольский А. М., Панова М. А. Хлориты оловорудных месторождений и термоаналитический метод определения их состава.— Изв. вузов, геология и разведка, 1975, № 2.
- Доломанова Е. И. Оловянно-вольфрамовые месторождения Ингодинского рудного узла и их генетические особенности.— Труды ИГЕМ АН СССР, 1959, вып. 23.
- Доломанова Е. И. Свинцово-цинковая минерализация на некоторых касситерито-кварцево-сульфидных месторождениях Восточного Забайкалья.— Труды ИГЕМ АН СССР, 1963, вып. 83.
- Доломанова Е. И., Лосева Т. И., Цепин А. И. К вопросу о химическом составе твердых осадков в вакуолях касситерита, турмалина и кварца из оловорудных месторождений.— В кн.: Проблемы эндогенного рудообразования, «Наука», 1974.
- Звягин Б. Б., Доломанова Е. И., Молева В. А. О диоктаэдрической Al-слюде 1M из Лево-Ингодинского оловянно-вольфрамового месторождения в Забайкалье.— Докл. АН СССР, 1965, 165, № 3.
- Лазарев А. Н. Колебательные спектры и строение силикатов. Л., «Наука», 1968.
- Некрасов П. Я., Зиборова Т. А. Об изоморфизме и систематике боросиликатов.— В кн.: Очерки физико-химической петрологии. «Наука», 1974.
- Ito T., Sadanaga R. A. Fourieranalysis of the structure of tourmalin.— Acta crust., 1951, 4, pt. 5.