

УДК 549.2/8:552.3/.5 (470.21)

**Ю.Н. Нерадовский**

Геологический институт Кольского научного центра РАН  
184209, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, ул. Ферсмана, 14  
E-mail: nerad@geoksc.apatity.ru

## К ВОПРОСУ ОБРАЗОВАНИЯ ДВОЙНИКОВ СТАВРОЛИТА В МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОДАХ (НА ПРИМЕРЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛАНЦЕВ КЕЙВ, КОЛЬСКИЙ П-ОВ)

Исследован механизм зарождения и формирования двойников ставролита в кристаллических плагиоклаз-ставролитовых сланцах. Показано, что образование двойников в рассматриваемых метаморфических породах происходило в результате механического воздействия на зародыши ставролита растягивающих сил пластического "течения" сланцев в процессе их формирования. Внутреннее строение двойников отражает метаморфизм сланцев и помогает восстановить динамику развития процесса.

**Введение.** Ставролит известен как весьма распространенный в различных породах минерал, часто образующий кристаллы и двойники [9, 6]. Как минеральное сырье ставролит представляет интерес прежде всего в металлургии [5, 7]. В кристаллических сланцах кейвской серии, относящейся к верхнему архею, ставролит является одним из главных минералов и присутствует исключительно в виде кристаллов. Наиболее распространен в плагиоклаз-ставролитовых сланцах, где содержание минерала составляет 15—20 %. Главные кристаллографические формы на кристаллах кейвских ставролитов: призмы  $m$  {110} и  $r$  {201} и пинакоиды  $c$  {001} и  $b$  {010}, часто встречаются двойники по {231}, реже по {031} [1]. Детальное изучение ставролита в кейвских сланцах ранее не было проведено и в настоящее время существуют лишь отрывочные сведения о его генезисе. В связи с этим нами проведено исследование условий образования ставролита на основе зональности и двойникования.

**Кристаллы ставролита. Сростки.** Основная часть агрегатов зерен ставролита в сланцах — сростки. В них кристаллы ориентированы случайным образом. Особенностью сростков

является образование из разных зародышей и независимое развитие зональности в кристаллах (рис. 1). Вместе с тем каждый индивид в сростке может иметь свою схему зональности, что свидетельствует об их одно- или разновременном зарождении.

*Двойники* — закономерные сростки кристаллов, имеющие общую плоскость срастания и согласованные элементы внутреннего строения. Плоскостями двойникования в ставролите служат плоскость {031}, обуславливающая пересечение кристаллов под прямым углом, и плоскость {231} — под углом 60°/120° [9]. Учитывая, что плоскость двойникования в кристаллах ставролита параллельна грани  $b$  (010), мы измеряли углы между этими гранями в разных кристаллах, что позволило определить тип двойникования (рис. 2). Всего было изучено 46 кристаллов, из которых 7 оказались двойниками, в том числе 3 — по плоскости {031} и 4 — по плоскости {231}.

Исследования показали, что двойникование ставролита в кристаллических сланцах кейвской свиты имеет ограничения. Во-первых, двойники встречаются только в плагиоклаз-ставролитовых сланцах, а в кианитовых сланцах не образуются. Во-вторых, двойникованию подвержены только кристаллы, "плавающие" в субстрате. Не установлены двой-

© Ю.Н. НЕРАДОВСКИЙ, 2011

ники в кристаллах ставролита, нарастающих на стенки трещин.

**Зарождение двойников.** Двойники ставролита достоверно определяются по внутреннему строению кристаллов. Предполагается, что на ранней стадии метаморфизма зародились ядра кристаллов ставролита, которые под действием сил пластичного "течения" сланца удлинились. Структура кристаллов показывает, что зарождение и кристаллизация двойников произошли на этой стадии вследствие деформа-

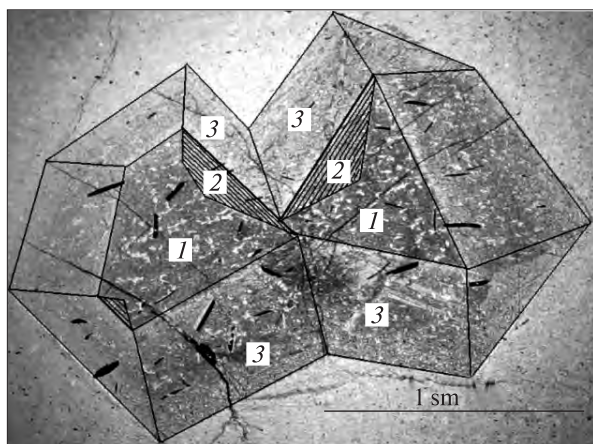


Рис. 1. Сросток двух кристаллов ставролита, показана структура зональности: 1 — ядро, 2 — вторая зона (ретуширована), 3 — третья зона. Шлиф

Fig. 1. Intergrowth of two staurolite crystals. The zoning structure is shown: 1 — nucleus, 2 — second zone (retouched), 3 — third zone. Thin section

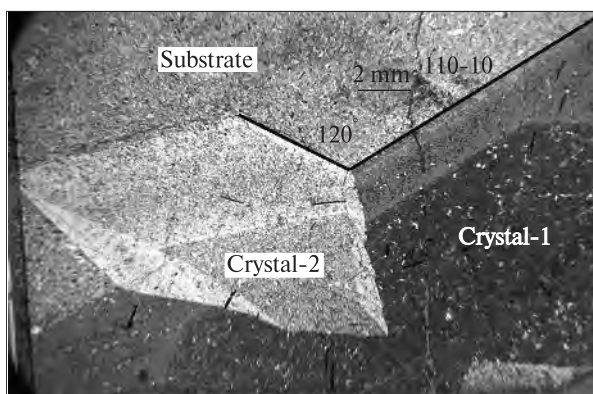
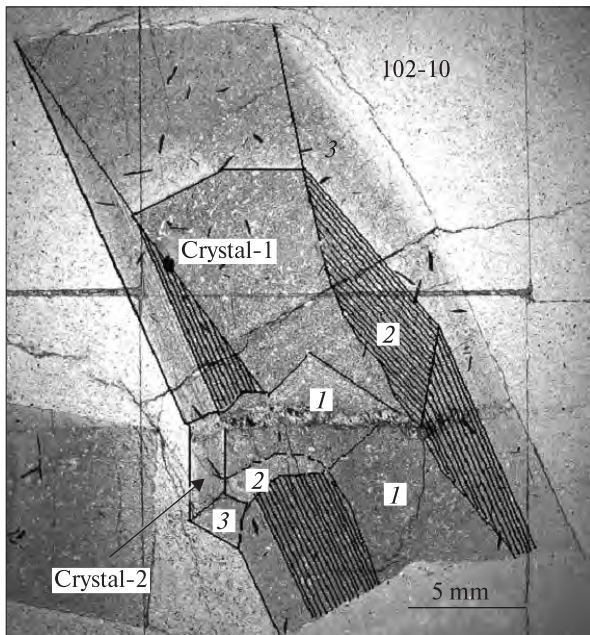


Рис. 2. Схема измерения угла между гранями кристалла-1 и 2 в двойнике ставролита по {231}. Шлиф, николи +. Субстрат — мусковито-кварцевая основная ткань породы, в которой росли кристаллы

Fig. 2. Scheme of the angle measuring between crystal-1 and 2 faces in the staurolite twin according to {231}. Thin section, nicoli +. Substrate — muscovite-quartz basic tissue of the rock, where crystals grew

ции разрыва в некоторых кристаллах. Морфология ядер свидетельствует, что они еще не были огранены полностью, но на них присутствовали, вероятно, грани пинакоида С, поскольку последующее развитие (удлинение) происходило вдоль оси с. Движущими силами для "растяжения" кристаллов в кристаллических сланцах могли быть деформации вмещающей породы, подверженной "течению" [10] и деформации минерала как "участника, воспринимающего внешние напряжения" [11]. Глубинное пластическое "течение" материала при образовании кианитовых сланцев на этапе регионального метаморфизма многие исследователи Кейв признают как механизм формирования пород [1, 8]. Следует отметить, что в преобладающей массе кристаллов двойники не образовывались вследствие того, что деформация растяжения ядра происходила без разрыва сплошности. Некоторые исследователи полагают, что растяжение кристаллов без разрыва сплошности могло произойти в результате деформации материала ядра по принципу "миграции дислокаций" решетки и трансляционного скольжения [10], сопровождавшихся залечиванием дефектов. Механизм "залечивания" деформированных кристаллов описан в работах Д.П. Григорьева [3], Н.П. Юшкина [11].

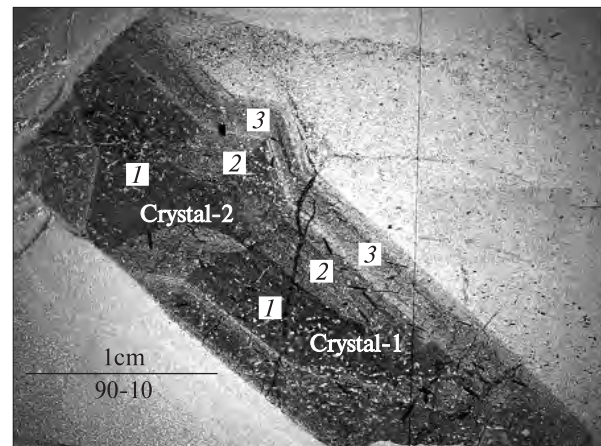
Первые признаки двойникования наблюдаются в разрывах ядра кристаллов ставролита. В некоторых кристаллах встречается клинообразный врез, в котором находится зародыш другого кристалла (рис. 3). Таким образом, в двойниках ставролита кристаллы зарождались одновременно и следует выделять кристалл-1 и кристалл-2. Кристалл-2 изначально был ориентирован либо по {231}, либо по {031}. В дальнейшем его развитие приводило к образованию косоугольного или крестообразного двойника. Весьма интересно, что зарождение кристалла-2 с двух сторон кристалла-1 иногда происходило не одновременно. Противоположная половина кристалла-2 появлялась позднее, тем не менее ориентировка кристалла-2 по плоскости сохранялась, поэтому можно полагать, что при зарождении первой части кристалла-2 в кристалле-1 уже была заложена "сквозная" плоскость двойникования. Несмотря на разную ориентировку в пространстве и размеры, двойниковый шов расположен всегда близко к середине сросшихся кристаллов.



*Рис. 3.* Начальная фаза зарождения кристалла-2: зародыш наблюдается в клиновидном врезе с одной стороны кристалла-1. Элементы внутреннего строения кристаллов: 1 — ядро, 2 — вторая зона, 3 — третья зона. Шлиф

*Fig. 3.* The primary stage of crystal-2 nucleation: the embryo is observed in a wedge-like incision on one side of crystal-1. Elements of intercrystal structure: 1 — nucleus, 2 — second zone, 3 — third zone. Thin section

Установлены все переходные стадии роста кристалла-2 от зарождения до полного пересечения кристалла-1 (рис. 4, 5). В связи с одновременным появлением головок кристалла-2 нередко наблюдается несовпадение высоты ребер и граней кристалла-2 по обе



*Рис. 4.* Промежуточная фаза роста двойника. Произошло "сквозное" пересечение кристаллом-2 кристалла-1 при полном разрыве его ядра. Элементы внутреннего строения кристаллов: 1 — ядро, 2 — вторая зона, 3 — третья зона. Шлиф

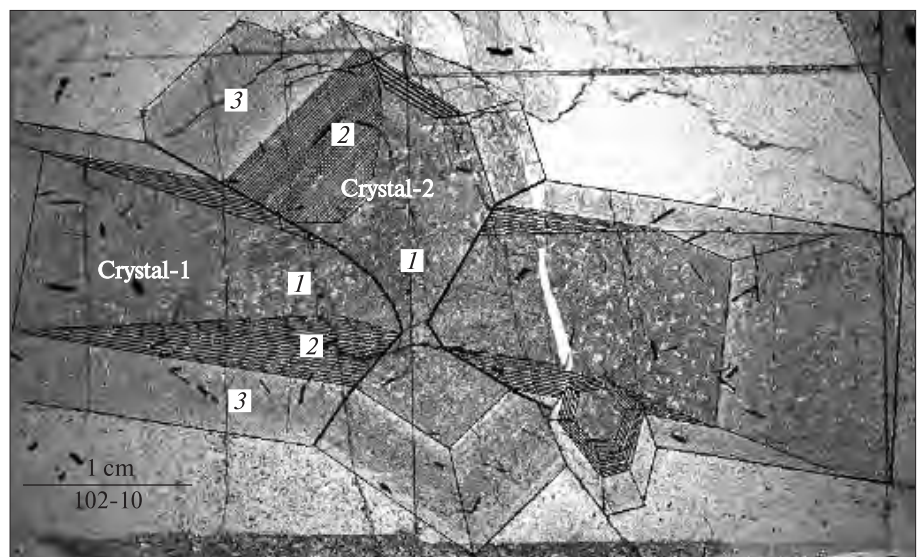
*Fig. 4.* Intermediate phase of twin growing. A "through" crossing of crystal-1 by crystal-2 at complete break of its nucleus. Elements of intercrystal structure: 1 — nucleus, 2 — second zone, 3 — third zone. Thin section

стороны от кристалла-1. Контакт кристаллов 1 и 2 всегда имеет ступенчатую форму вследствие развития индукционных граней (рис. 6).

Завершение формирования двойников произошло одновременно с окончанием растяжения ядра, т. е. на второй стадии кристаллизации ставролита. Внутреннее строение кристаллов свидетельствует о том, что после завершения стадии пластического "течения" сланцев закончилось удлинение ядер кристаллов и формирование двойников.

*Рис. 5.* Полностью развитый двойник: в кристалле-1 ядро пересечено кристаллом-2, оба кристалла обросли третьей зоной. Элементы внутреннего строения кристаллов: 1 — ядро, 2 — вторая зона, 3 — третья зона. Шлиф

*Fig. 5.* Fully grown twin: the nucleus in crystal-1 is crossed by crystal-2, both crystals got overgrown by zone III. Elements of intercrystal structure: 1 — nucleus, 2 — second zone, 3 — third zone. Thin section section



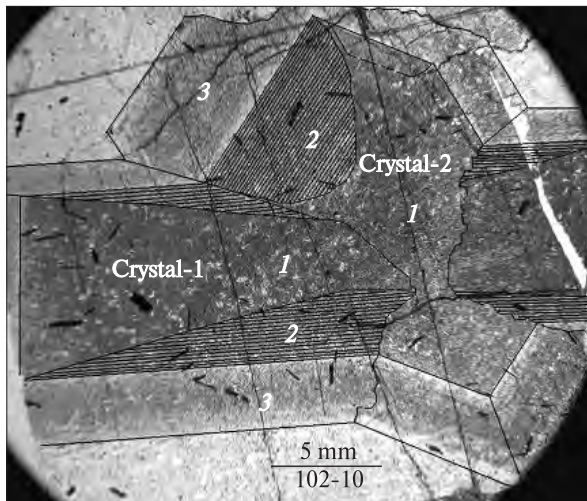


Рис. 6. Строение границы между кристаллами в двойнике: ступенчатая форма, указывающая на индукционный тип граней. Шлиф, николи +

Fig. 6. Structure of the boundary between crystals in a twin: stepped form indicating the induction type of faces. Thin section, nicoli +

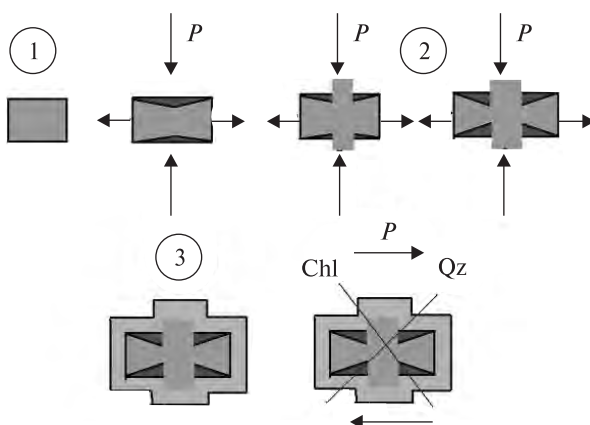


Рис. 7. Схема формирования двойников ставролита: 1 — образование ядра; 2 — растяжение ядра кристалла-1, залечивание деформированных участков, зарождение и рост кристалла-2; 3 — обрастание двойника общей зоной, хрупкая деформация и развитие поздних кварцевых и хлоритовых прожилков по ставролиту

Fig. 7. Scheme of staurolite twins forming: 1 — nucleus forming; 2 — crystal-1 nucleus stretching, healing of deformed sections, nucleation and growth of crystal-2; 3 — twin overgrowth by the total zone, brittle deformation and development of late quartz and chlorite veinlets on staurolite

Позже все кристаллы и двойники обрастали третьей зоной, которая присутствует на всех гранях.

**Обсуждение результатов.** Исследования показали, что некоторой части кристаллов став-

ролита в метаморфических породах Кейв свойственно двойникование. Двойники "плавают" в субстрате, имеют характерное для свободной кристаллизации в растворе внутреннее строение. Все кристаллы двухголовые с четко проявленной зональностью и ограничены со всех сторон. Судя по их строению, двойниковый шов образовывался в кристаллах, направление оси *c* которых более всего соответствовало направлению сланцеватости.

В отличие от "плавающих" в субстрате, выросшие на стенки трещин кристаллы всегда одноголовые, головки их направлены в сторону субстрата. Этим кристаллам не свойственно двойникование. Удлинение кристаллов направлено в сторону субстрата, обычно перпендикулярно плоскости трещины. Изучение зональности позволяет утверждать, что рост этих кристаллов был не менее интенсивным, чем "плавающих", но они не подвергались деформации растяжения, поэтому среди них не встречаются двойники.

Проведенные исследования позволяют представить трехстадийную схему формирования двойников (рис. 7). *Первая стадия кристаллизации ставролита* — зарождение ядра, вероятно, совпадает с диа- и катагенезом осадочных пород и соответствует событию  $M_2$  — "синтектоническому метаморфизму" ( $T = 450-560$  °C,  $P = 4-5,5$  кбар). Условия образования ядерной части кристаллов ставролита соответствовали условиям метаморфической реакции в ставролит-дистен-двуслюдяной субфации [8].

*Вторая стадия кристаллизации ставролита* произошла под воздействием сил пластического "течения" сланца и, возможно, в условиях "фации биметасоматоза и тектоно-метаморфической дифференциации", в качестве результата которой рассматривается ставролитовый порфиробластез ( $T = 500-600$  °C,  $P = 4-5$  кбар) [8]. Механизм роста кристаллов ставролита на этой стадии сочетал деформацию и незначительный рост отдельных частей кристаллов. Деформация сопровождалась растяжением ядра, залечиванием его и кристаллизацией второй зоны. Увеличение объема кристаллов во время второй стадии было незначительным, что свидетельствует о слабом перемещении гидротерм и переносе вещества.

*Третья стадия кристаллизации ставролита* происходила в условиях интенсивного гидро-

термального метасоматоза. На этой стадии произошло нарастание третьей зоны, резко увеличился объем ставролита в сланцах. Механизм кристаллизации соответствовал метасоматическому с пульсационным поступлением растворов, а обстановка — "спокойным" тектоническим условиям, деформация кристаллов не происходила. Рост кристаллов ставролита на стадии образования третьей зоны проходил согласно механизмам, рассмотренным в работах А.Г. Жабина [4] и Ю.К. Воробьева [2]. Наиболее признано представление о росте метакристаллов благодаря окружающим их пленкам питающего раствора [4]. Оно удовлетворительно объясняет особенности онтогении кристаллов ставролита. Активность роста граней контролировалась направлением поступления растворов. После завершения формирования кристаллов и двойников ставролита происходили события, связанные с образованием хлорита, кварца и других поздних минералов, которые по трещинам пересекают ранее образованные кристаллы ставролита.

**Выводы.** 1. Двойникование ставролита в кристаллических сланцах происходило механическим путем в результате деформации разрыва одного из кристаллов двойника.

2. Деформация — следствие пластического "течения" кристаллических сланцев в период метаморфизма осадочных пород.

3. Рост двойников завершился с окончанием пластического "течения" сланцев. После завершения деформации пластического "течения" двойники обрастали одной общей зоной в условиях метасоматического процесса.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке программы № 24 "Научные основы инновационных энергоресурсосберегающих экологически безопасных технологий оценки и освоения природных и техногенных ресурсов" фундаментальных исследований Президиума РАН на 2011 г.*

1. Бельков И.В. Кианитовые сланцы свиты Кейв (геологическое строение, кристаллические сланцы и кианитовые руды). — М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1963. — С. 321 с.
2. Воробьев Ю.К. Процесс роста кристаллов минералов // Современные проблемы минералогии и сопредельных наук : Тез. докл. VIII съезда ВМО. — СПб., 1992. — С. 8—10.
3. Григорьев Д.П. Онтогения минералов. — Львов : Изд-во Львов. гос. ун-та, 1961. — 284 с.
4. Жабин А.Г. Метакристаллы и критерии относительного идиоморфизма минералов // Генезис мине-

ральных индивидов и агрегатов. — М. : Наука, 1966. — С. 34—50.

5. Кривонос В.П., Панов Б.С., Полуновский Р.М., Чурочкин В.Н. Новая сырьевая база ставролита на Украине // Разведка и охрана недр. — 1987. — № 12. — С. 28—32.
6. Минералы : Справ. — М. : Наука, 1972. — Т. III, вып. I. — 882 с.
7. Панов Б.С., Панов Ю.Б. Современное состояние и некоторые перспективы развития минерально-сырьевого комплекса Донецкой области на период до 2020 г. // <http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/ggeo/fenyushina/ind/panov2.htm>.
8. Петров В.П., Глазунков А.Н. Этапность и термодинамический режим метаморфизма Кейвского блока // Строение и метаморфическая эволюция главных структурных зон Балтийского щита. — Апатиты : Изд-во Кол. фил. АН СССР, 1986. — С. 50—59.
9. Федькин В.В. Ставролит. — М. : Наука, 1975. — 272 с.
10. Флинн Д. Деформации при метаморфизме // Природа метаморфизма. — М. : Наука, 1967. — С. 49—77. — (Сер. Науки о Земле; Т. 2).
11. Юшкин Н.П. Механические свойства минералов. — Л. : Наука, 1971. — 283 с.

Поступила 23.06.2011

*Ю.М. Нерадовский*

#### ДО ПИТАННЯ ПРО УТВОРЕННЯ ДВІЙНИКІВ СТАВРОЛІТУ В МЕТАМОРФІЧНИХ ПОРОДАХ (НА ПРИКЛАДІ КРИСТАЛІЧНИХ СЛАНЦІВ КЕЙВ, КОЛЬСЬКИЙ П-ІВ)

Досліджено механізм зародження і формування двійників ставроліту в кристалічних плагіоклаз-ставролітових сланцях. Показано, що утворення двійників у цих метаморфічних породах відбувалося внаслідок механічної дії розтягувальних сил пластичної "течії" сланців на зародки ставроліту в процесі їх формування. Внутрішня будова двійників відображає метаморфізм сланців і допомагає відновити динаміку розвитку процесу.

*Yu.N. Neradovsky*

#### ON THE PROBLEM OF STAUROLITE TWINS FORMATION IN METAMORPHIC ROCKS (ON THE EXAMPLE OF THE KEIVY CRYSTALLINE SCHISTS, THE KOLA PENINSULA)

The genesis of staurolite twins in crystalline plagioclase-staurolite schists of the Keivy schists (the Kola Peninsula) has been studied. It is shown that the twins in the metamorphic rocks under question have formed as a result of staurolite nuclei, being mechanically affected by stretching forces of an elastic "flow" of schists during their formation. The twins structure reflects metamorphism of the schists and helps restore the process dynamics. A peculiar feature of staurolite in the studied rocks is its zoning, remarkably distinct in every crystal. A special paper is dedicated to the study of the zoning. Major elements of zonal crystals are a

nucleus and two I-genus zones. A thin II-genus zoning is developed in I-genus zones. The structure of staurolite crystals allows defining three stages of its formation. The first stage is characterized by the formation of nuclei, i. e. the embryos of future staurolite crystals on the initial stage of the crystalline schists formation as a result of metamorphic reaction. The second stage of the staurolite crystallization comprises the nucleus stretching and the second zone forming. The way the crystal grew in this period depended on the crystal space orientation. The motive forces for the crystals growth at the second stage were deformations of the comprising environment given to the "flow" and deformation of the mineral as a "participant perceiving external stresses". It is assumed that the nucleus stretching deformation in the direction of the schists "flow" occurred under the effect of forces of the elastic schist flow. During the stretching deformation the nucleus elongated with no continuity break or divided into two parts, both of these parts being remote from the long crystal axis. In the first case the twinning took place in a number of crystals. It is supposed that the stretching of crystals with no continuity break resulted from the nucleus material deformation according to the cell "migration of dislocations" and translation gliding. The latter is accompanied by hea-

ling of defects. The first signs of the twinning are observed at the boundaries of a staurolite crystal nucleus. A wedge-like incision with a twin embryo is observed on the nucleus of twin crystals. The embryo was initially oriented according to either {231} or {031}, which resulted in the formation of an oblique or cruciform twin. The crystal-2 happened to originate not on two sides of the crystal-1, but on one side. The opposite half of the crystal-2 was formed later. However, the crystal preserved its space orientation on a plane, which provided the suggestion that a "through" twinning plane existed in the crystal-1 during the crystal-2 origination. Interestingly, the twinning joint is always close to the heart of the intergrown crystals. Thus, crystals in staurolite twins originated at different times and it is necessary to distinguish crystal-1 and crystal-2. Depending on the orientation according to {231} or {031}, crystal-2 grew and crossed the nucleus of the host crystal obliquely or perpendicularly. The third stage of the staurolite crystallization is characterized by regular tectonic conditions and a growth of crystals in all directions. Once the nucleus stopped stretching and the second zone crystallized, the formation of twins finished. All crystals, including twin ones, got overgrown by planes of the third zone, i. e. obtained the current shape.