

УДК 551.2.03(470.57)

Е.А. Шмонова<sup>1</sup>, Ал.В. Тевелев<sup>2</sup>, Арк.В. Тевелев<sup>3</sup>

## МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ СКЛАДЧАТОГО КОМПЛЕКСА КУГАРЧИ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Складчатый комплекс Кугарчи расположен на западном склоне Южного Урала. Он представляет собой участок сложных дисгармоничных складок, сложенных слоистыми известняками нижнего карбона. В известняках изучены две системы минеральных жил и разнообразные прожилки. С помощью микроструктурного анализа выделены этапы деформаций и определены ориентировки главных осей поля напряжений. Складчатый комплекс формировался в условиях, близких к одноосному сжатию, при котором растягивающие напряжения сначала имели вертикальную ориентировку, а затем горизонтальную.

*Ключевые слова:* микроструктурный анализ, складки, трещины отрыва, минеральные жилы.

The Kugarchy folded complex is located on the western slope of the South Ural Mountains. This is relatively small region of the intricate disharmonic folds composed of Lower Carboniferous limestone. We revealed and studied two systems of mineral veins and accompanying veinlets into limestone. By means of microstructural analyses there were established the consequence of deformation and change in orientation of the principal stress axes. The folded complex was formed in setting of nearly uniaxial compression, in which primarily vertical tensional stress was substituted for horizontal one.

*Key words:* microstructural analyses, folds, opening cracks, mineral veins

**Введение.** Складчатый комплекс нижнекаменноугольных известняков изучен в обнажении Кугарчи на западном склоне Южного Урала. Выбранный для изучения объект расположен на территории Республики Башкортостан, в 1 км на восток от д. Кугарчи (рис. 1), у Ямашлинского пруда (водохранилища). Здесь, в правом борту р. Ямашла, в обрыве над шоссе Зилаир–Кугарчи слоистые известняки образуют скальную стенку общей длиной приблизительно 200–250 м и высотой до 15–20 м. Для известняков установлен каменноугольный возраст [Государственная..., 1950]. Согласно данным научно-производственных работ, которые проводили Н.М. Кочеткова, Е.И. Кулагина, В.Н. Пазухин и др. (1985), эти отложения относятся к серпуховскому ярусу и нижней части башкирского яруса.

На объекте Кугарчи мы провели комплекс структурных исследований, направленных на выяснение условий формирования складчатой структуры. В этот комплекс входило описание морфологии отдельных складок, изучение ориентировки элементов складок (крыльев, шарниров, осевых поверхностей), изучение морфологии и ориентировки мезоструктур (штриховок, структур вращения, ансамблей прожилков и т.д.), отбор ориентированных образцов для последующего измерения скорости прохождения сейсмических волн и изучения микроструктур в ориентированных

шлифах. Статья посвящена результатам микроструктурного анализа.

Микроструктурный анализ — один из основных методов изучения деформационных структур горных пород. Поэтому при восстановлении условий и механизмов формирования складчатой структуры Кугарчи большое внимание уделялось изучению строения и состава минеральных жил, а также их пространственной ориентировки.

**Общая структура складчатого комплекса.** Скальная стенка (рис. 2) сложена разными по мощности (от 5 до 60–70 см) слоями окремнелых известняков, плотных, кремново-желтых на выветрелой поверхности и серых на свежем сколе, с прослоями кремней, чередующихся с плотными тонкоплитчатыми аргиллитами более темной окраски. Мощность пластов известняков варьирует от нескольких сантиметров до 5–6 м, а мощность аргиллитов не превышает нескольких сантиметров (от 0,5 до 1–2 см).

На объекте Кугарчи толща имеет очень сложное строение. Верхнюю часть изученного разреза составляет пачка мощных пластов известняков, которые смяты в крупную (ширина около 200 м) пологую Кугарчинскую антиклиналь. Расположенная ниже пачка тонкослоистых пород деформирована крайне неравномерно. В ядре антиклинали породы смяты в сложные дисгармоничные складки, на западном крыле она

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, студентка 1-го курса магистратуры; *e-mail:* lenka1890@rambler.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, вед. науч. с., докт. геол.-минер. н.; *e-mail:* atevelev@rambler.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор, докт. геол.-минер. н.; *e-mail:* arctevelev@rambler.ru



Рис. 1. Схема расположения объекта Кугарчи

осложнена небольшой синклиналью, здесь чередуются участки моноклиального и складчатого залегания слоев. В некоторых местах западное крыло осложнено флексурами и малоамплитудными разрывами. На восточном крыле Кугарчинской антиклинали тонко-

слоистая пачка деформирована значительно меньше, здесь преобладает моноклиальное залегание, иногда осложненное встречными флексурами.

По всему разрезу обнажения встречаются мелкие разноориентированные минеральные жилы, а также незаполненные (пустые) и частично заполненные (полупустые) трещины отрыва. Их строение и ориентировка были изучены непосредственно в обнажении и ориентированных образцах-кубиках. Кроме того, для микроструктурного анализа исследованы литологические шлифы, в том числе ориентированные.

#### Ориентировка минеральных жил в пространстве.

В пределах обнажения Кугарчи выделены две главные системы трещин отрыва, заполненных минеральными жилами (рис. 3). Одна из них (1) наблюдается преимущественно в крутых крыльях локальных складок и ориентирована примерно параллельно их шарнирам и ортогонально к осевым поверхностям, т.е. приблизительно параллельно поверхности перегиба. Поскольку шарниры большинства складок ориентированы полого, а осевые поверхности круто, первая система трещин тоже, как правило, пологая. Хорошо сохранившиеся жилы такой ориентировки остались только в некоторых частях обнажения. Обычно они слагают серии (10–15) близкорасположенных параллельных прожилков мощностью 2–4 мм, разделенных скринами известняков мощностью 3–6 мм (рис. 4, А). Вместе с тем практически повсеместно в слоях встречаются «пустые» трещины отрыва, которые или не были заполнены, или оказались пустыми из-за последующего выщелачивания заполнявших их минералов (рис. 4, Б).

Вторая система трещин, заполненных минеральными жилами, ориентирована нормально и к шарнирам складок, и к их осевым поверхностям, а следовательно, очень круто (рис. 3). На поверхности пластов

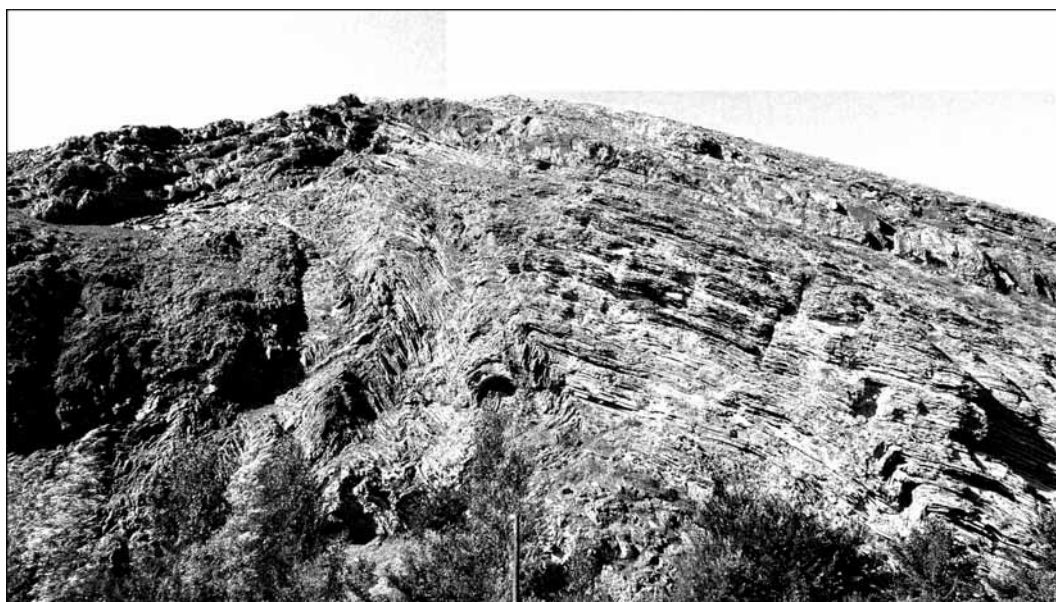


Рис. 2. Общий вид обнажения Кугарчи. В верхней части скального выхода хорошо видны мощные пласты известняков, слагающих Кугарчинскую антиклиналь, а ниже — дисгармонично смятые пачки тонкослоистых пород

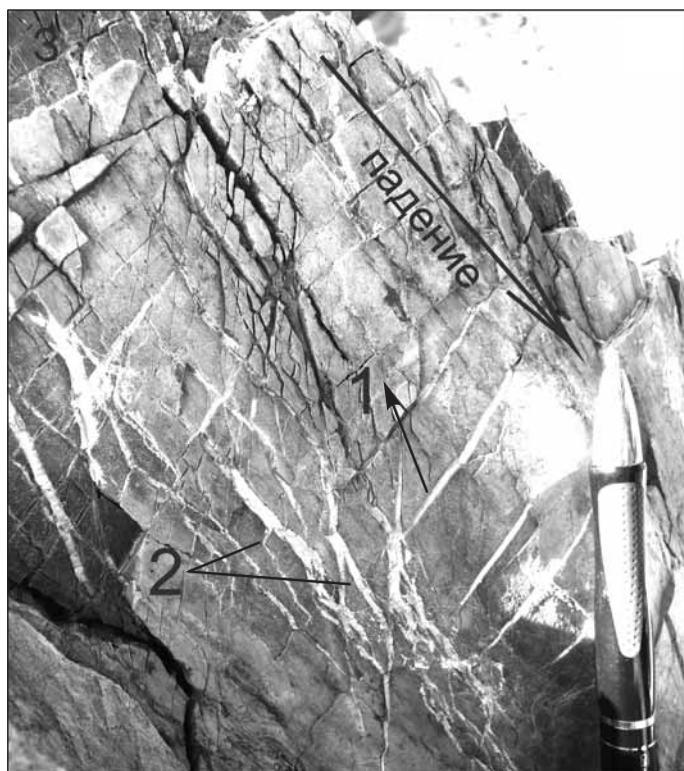


Рис. 3. Системы минеральных жил в складчатом комплексе Кугарчи: 1 — пологие минеральные жилы, параллельные шарниру и ортогональные к осевой поверхности складки; 2 — крутые минеральные жилы, нормальные и к шарниру, и к осевой поверхности. Соотношение жил разных систем неоднозначно

такие жилы маркируют линии падения—восстания (рис. 5, А). Особенно хорошо это видно в кубиках, выпиленных из ориентированных образцов (рис. 5, Б), на которых грань L параллельна поверхности слоя, грань S перпендикулярна поверхности слоя и проходит через линию падения, а грань Q — перпендикулярна поверхности слоя и линии падения. Прожилки второй системы часто распадаются на

отдельные линзовидные отрезки, расположенные кулисно один относительно другого. В самых мощных прожилках видно зональное строение.

Отметим, что в некоторых местах обнаруживается еще одна (третья) система прожилков, косо ориентированная к двум описанным (рис. 3). Но они, как и жилы первой системы, имеют параллельное расположение, а не кулисное. Все обнаруженные жилы отличаются небольшими размерами, имеют длину от нескольких сантиметров до 20–30 см и мощность от долей миллиметра до 3–4 мм.

**Микроструктурный анализ.** Изучение прожилков в шлифах показало, что в известняках присутствуют по крайней мере четыре группы прожилков: три группы мономинеральных (ранние кварцевые, кальцитовые и поздние кварцевые), а также комбинированные кварц-кальцитовые.

Наиболее сложно устроены кварц-кальцитовые прожилки, которые наблюдаются и визуальнo. Они самые мощные, а их минеральное заполнение неравномерно: внутри прожилков отчетливо видны тонкие «полоски» — сутурные швы, ориентированные вдоль их границ. В наиболее мощных из этих прожилков различимы как минимум три таких шва, что свидетельствует о стадийном раскрытии и выполнении жилы [Кирмасов, 2011]. По классификации, описанной Дж. Рэмси и М. Хабером [Ramsay, Huber, 1983], они относятся к плоскостным планпараллельным жилам. Все кварц-кальцитовые прожилки имеют одинаковую зональность: мелкие (до 20 мкм) изометричные зерна кварца образуют тонкие каймы по внешним границам прожилка, а остальное пространство занимают относительно крупные (до 0,2 мм) ровные кристаллы кальцита преимущественно прямоугольной формы (рис. 6).

В таких жилах обнаруживаются три сутурных шва — один посередине и два на стыке кварцевой и кальцитовой зон. Подобное строение жил позволяет

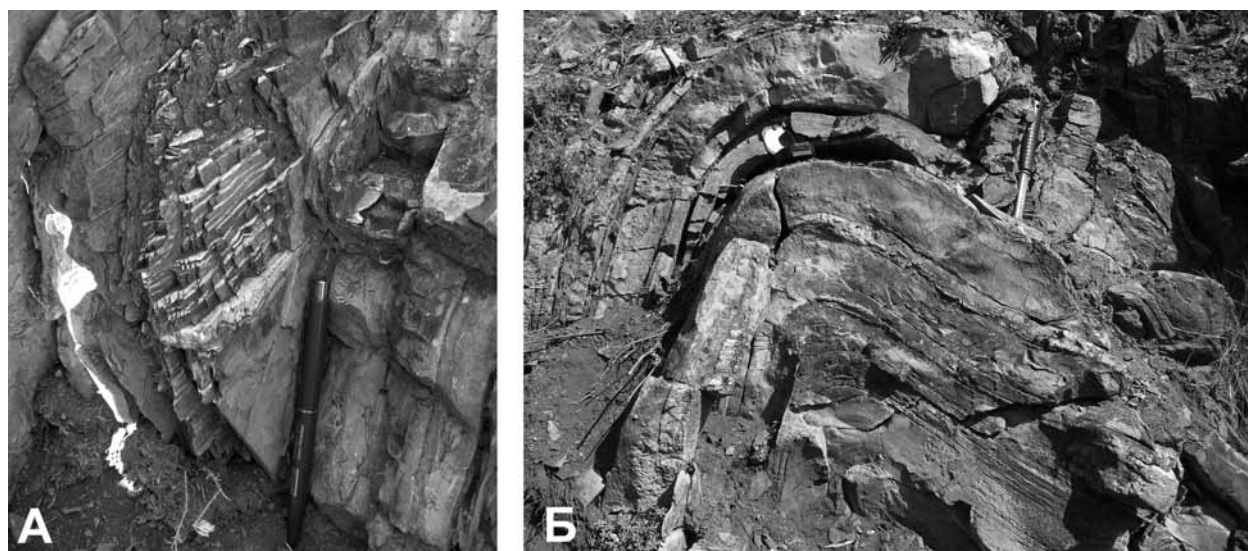


Рис. 4. Субгоризонтальные минеральные жилы и трещины в слоях кремнелых известняков (система 1): А — пологие минеральные жилы; Б — неминерализованные трещины с преобладающей пологой ориентировкой

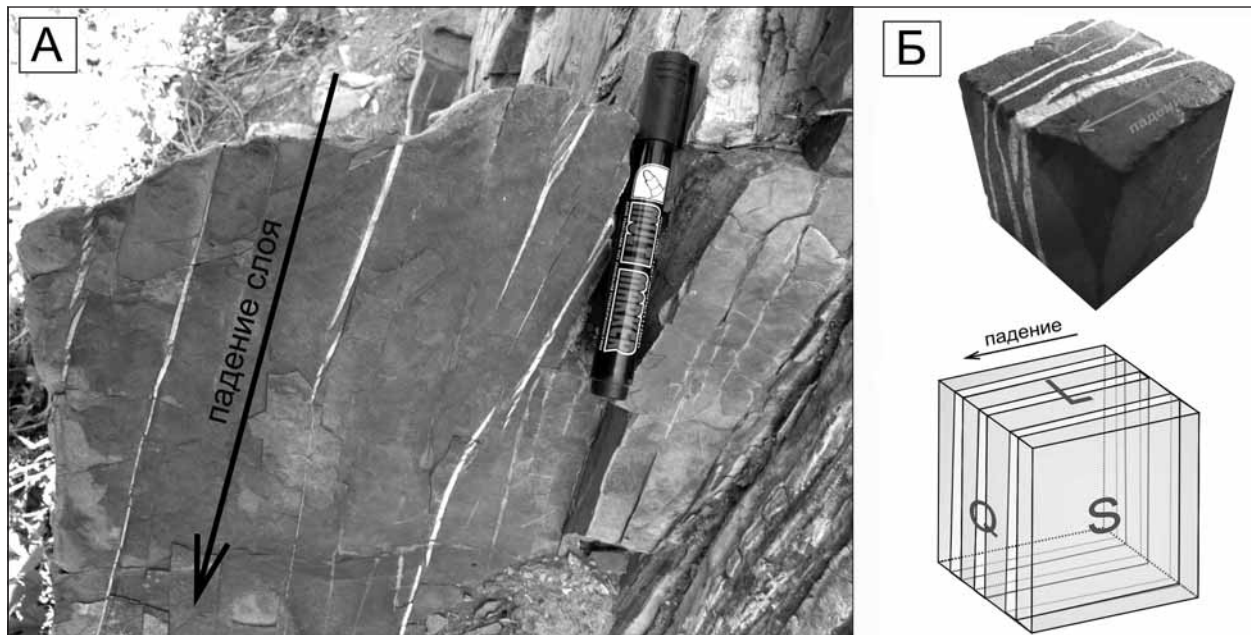


Рис. 5. Жилы, ориентированные ортогонально к шарнирам складок (система 2): А — положение жил на поверхности слоя (стрелкой показано направление падения слоя); Б — сверху расположение жил в ориентированных кубиках, внизу — обобщенная схема ориентировки жил в ориентированных образцах (грань L параллельна поверхности слоя, грань S перпендикулярна поверхности слоя и проходит через линию падения, а грань Q — перпендикулярна поверхности слоя и линии падения)

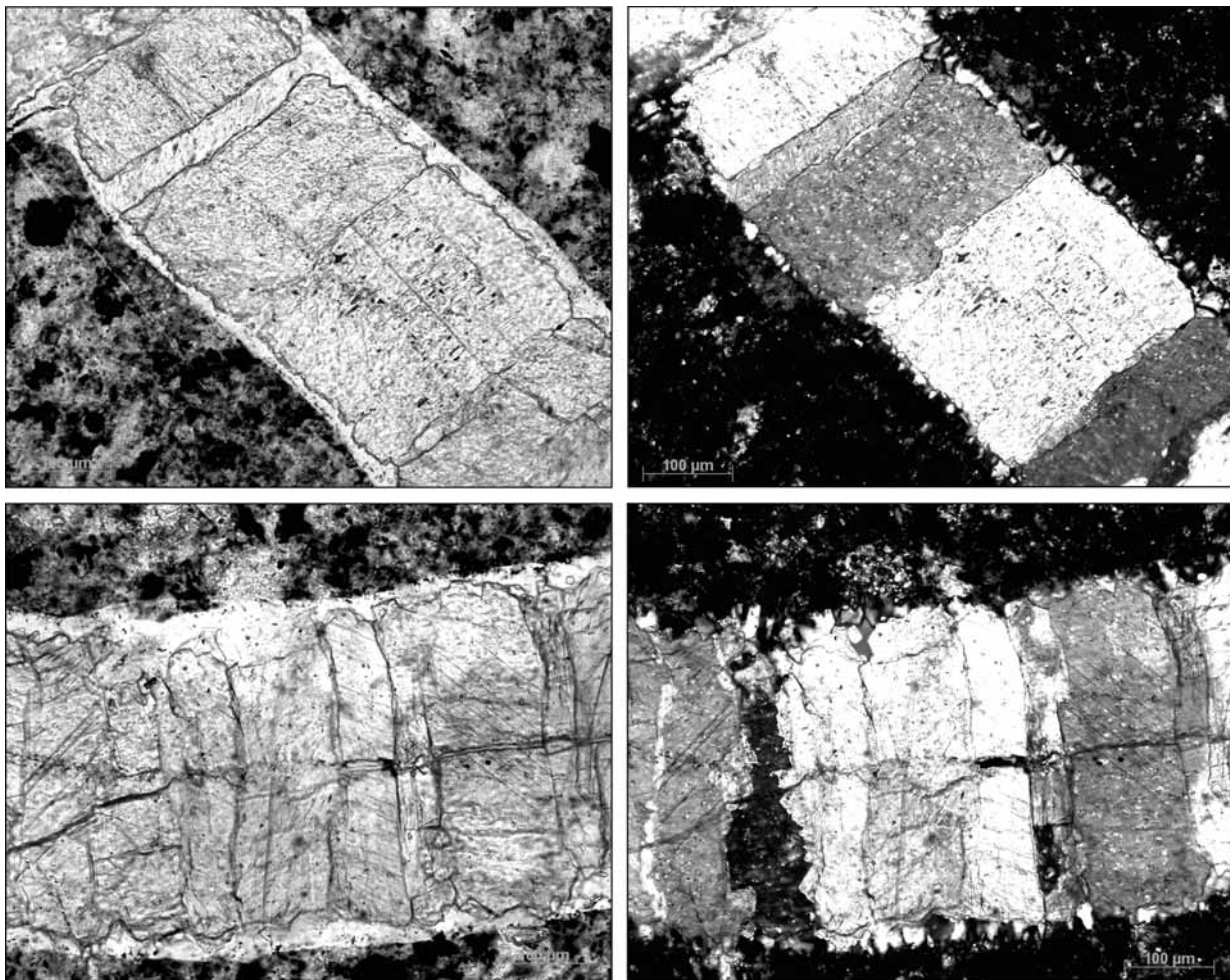


Рис. 6. Микрофотографии кварц-кальцитовых жил. Слева — николи параллельны, справа — николи скрещены

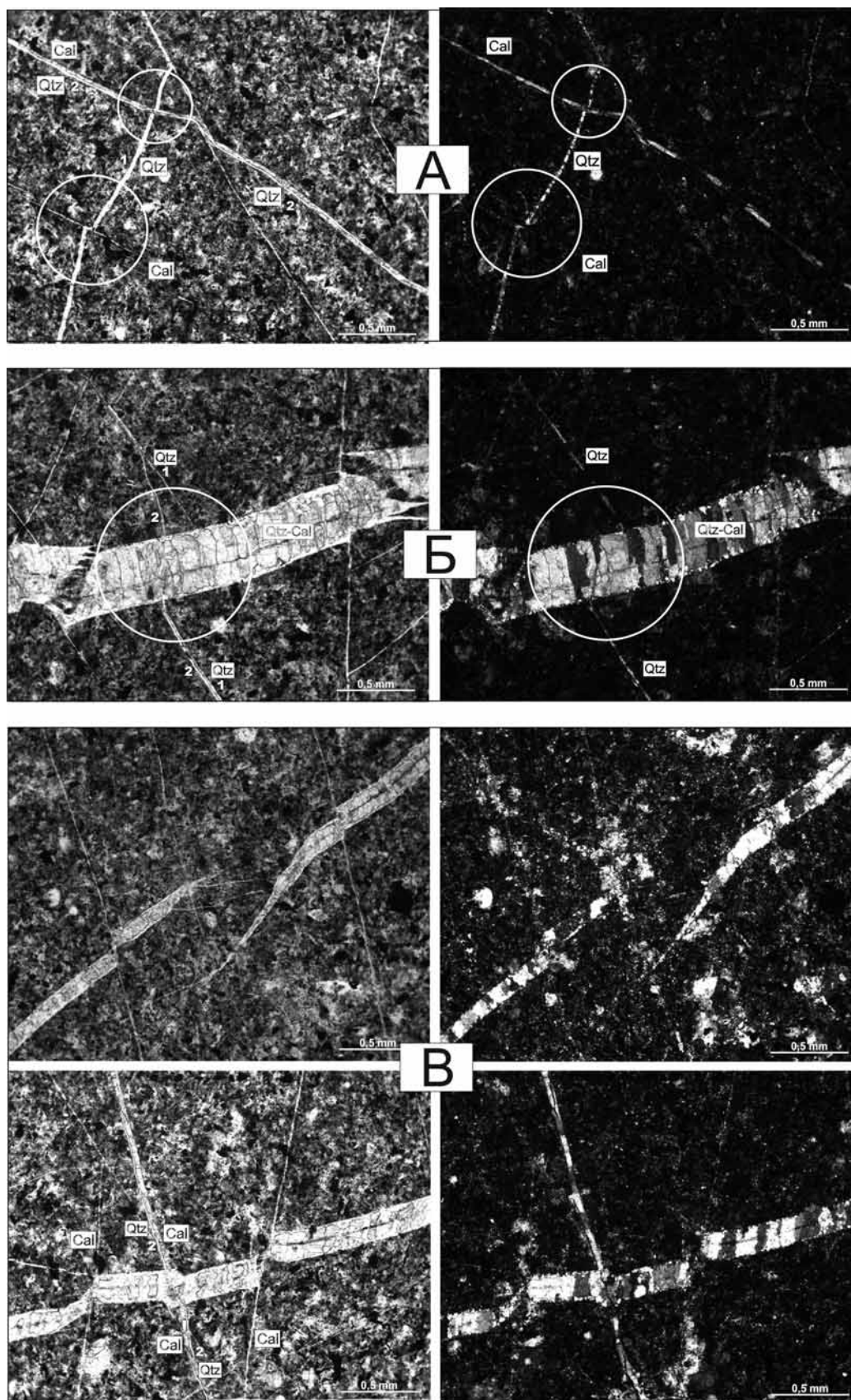


Рис. 7. Взаимоотношения минеральных жил: А — тонкие и прямолинейные ранние кварцевые прожилки пересечены тонкими и волосяными кальцитовыми и тонкими извилистыми поздними кварцевыми прожилками; Б — прямолинейные волосяные ранние кварцевые прожилки пересечены более мощными кварц-кальцитовыми, которые в свою очередь пересечены криволинейными волосяными поздними кварцевыми прожилками; В — более мощные кварц-кальцитовые прожилки пересечены тонкими кальцитовыми и поздними кварцевыми прожилками. Микрофотографии, слева — николи параллельны, справа — николи скрещены. Qtz — кварц, Cal — кальцит; 1, 2 — кварцевые прожилки: 1 — ранние, 2 — поздние

сделать вывод о том, что их развитие проходило как минимум в два этапа. Для первого этапа, вероятно, характерны относительно низкая скорость открытия трещин и относительно более высокотемпературные гидротермальные процессы. В этих условиях в узких трещинах отрыва стенки были инкрустированы кварцем. Второй этап характеризовался более быстрым раскрытием трещин и более низкотемпературными гидротермальными процессами. В это время в полостях росли кристаллы кальцита.

Как уже указывалось, помимо кварц-кальцитовых жил в карбонатах присутствует большое количество мономинеральных прожилков: очень тонких жилок, заполненных только кальцитом, и нитевидных — чисто кварцевых. В обнажениях наблюдать взаимоотношения различных прожилков не удалось, но в шлифах по взаимным пересечениям определена последовательность их образования. Сначала сформировались ранние кварцевые жилы. В шлифах хорошо видно, что в местах пересечения ранних кварцевых прожилков с кальцитовыми первые часто бывают смещены (рис. 7, А). Поздние кварцевые прожилки почти везде наследуют трещины, по которым образовались кальцитовые прожилки, но при этом практически всегда расположены в зальбандах кальцитовых прожилков, «перескакивая» с одного на другой (рис. 7, А, слева, в верхнем кружке). Взаимоотношения кварцевых жил с кварц-кальцитовыми в шлифах различимы хуже, однако в некоторых местах видно, что кварц-кальцитовые прожилки иногда смещают мономинеральные кварцевые (рис. 7, Б). Отчетливее всего проявлены взаимоотношения кварц-карбонатных и мономинеральных кальцитовых и поздних кварцевых прожилков. Кальцитовые и поздние кварцевые прожилки пересекают кварц-кальцитовые, практически повсеместно смещая их (рис. 7, В). Иногда при пересечении таких прожилков не происходит смещения кварц-кальцитовых, в этом случае кальцитовые жилы «преломляются» (рис. 7, В).

Таким образом, в соответствии с последовательностью формирования можно выделить 4 генерации прожилков:

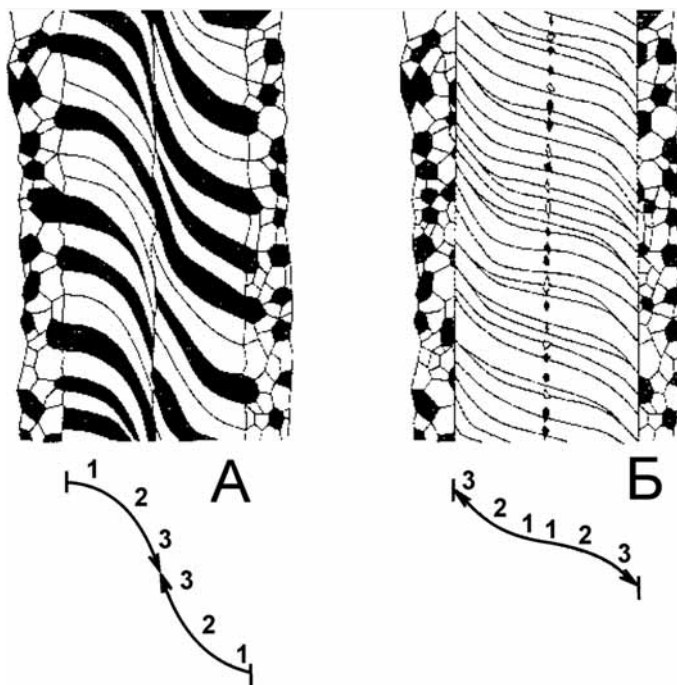


Рис. 8. Синтаксиальные (А) и антитаксиальные (Б) минеральные жилы, по [Ramsay, Huber, 1983]. Стрелками показаны следы раскрытия трещины, цифрами — стадии роста

1) мономинеральные ранние кварцевые; 2) полиминеральные кварц-кальцитовые; 3) мономинеральные кальцитовые; 4) мономинеральные поздние кварцевые.

По относительной мощности прожилков разных генераций можно примерно оценить продолжительность их формирования. Очень тонкие и волосяные прожилки формируются быстро и обычно образуют не устойчивые субпараллельные системы, а густые сети типа штокверков. Ориентировка отдельных трещин, как правило, зависит от локальных неоднородностей деформируемых пород. Максимальная продолжительность формирования характерна для кварц-карбонатных прожилков. Эти прожилки оказались наиболее интересны для микроструктурного анализа, поскольку именно они несут информацию о полях напряжения.

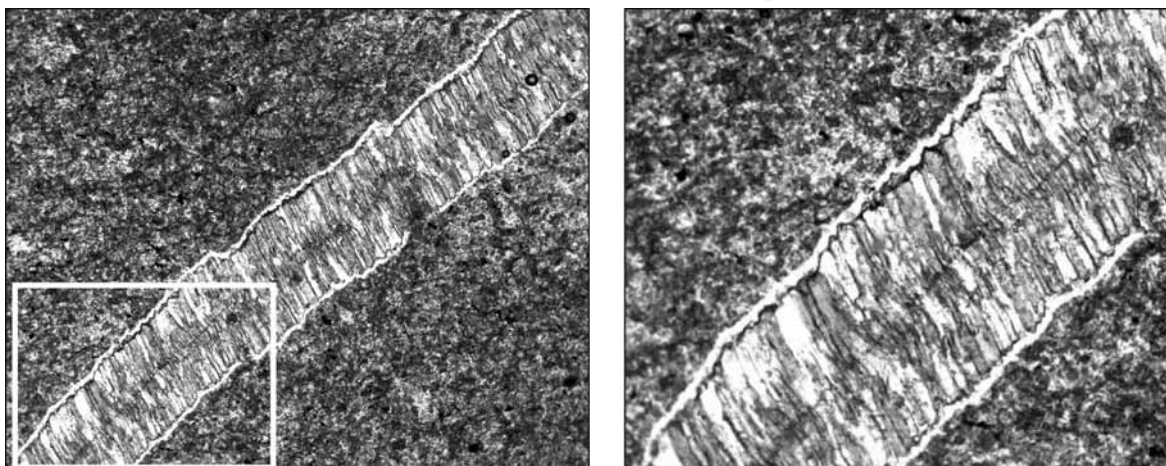


Рис. 9. Жила со слабоизогнутыми волокнами (слева — общий вид в шлифе, справа — фрагмент)

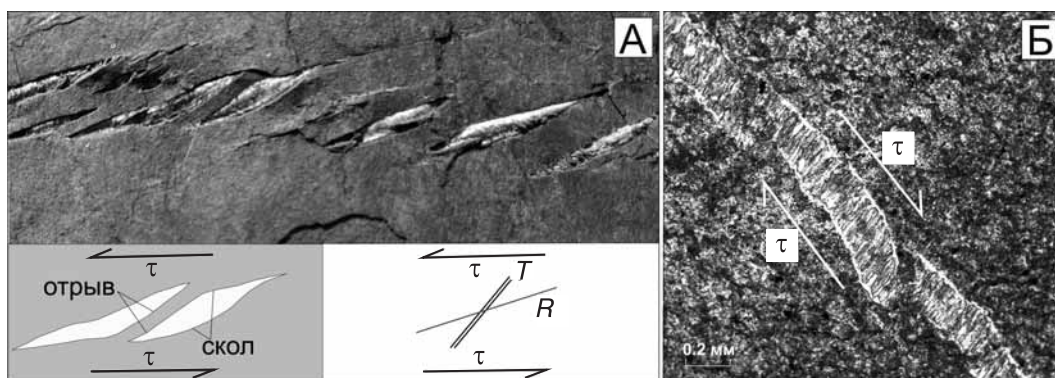


Рис. 10. Кулисные жилы в известняках: А — фото обнажения (вверху) и схема расположения отрывов ( $T$ ) и сколов Риделя ( $R$ ) в обстановке простого сдвига (внизу); Б — микрофотография шлифа с аналогичными микроструктурами. Стрелками показано направление тангенциальных напряжений ( $\tau$ )

По характеру заполнения минеральные жилы подразделяются [Ramsay, Huber, 1983] на синтаксиальные — центростремительные, в которых рост кристаллов происходил от стенок к центру, и антитаксиальные — центробежные, в которых кристаллы росли от сутурного шва к стенкам (рис. 8). Практически все изученные жилы комплекса Кугарчи относятся к синтаксиальным. Как правило, жилы ровные и прямые. Волокна кальцита в них также прямые, иногда слегка изогнутые (рис. 9). Однако среди минеральных жил встречаются и такие, в которых волокна имеют сильно изогнутую форму (о них речь пойдет ниже).

Как в обнажении (рис. 10, А), так и в шлифах (рис. 10, Б) часто наблюдается кулисное или эшелонированное расположение прожилков. При этом прожилки имеют изогнутую, сигмоидальную, а в простом случае ромбическую форму. Существует две основные модели, объясняющие формирование систем кулисных жил [Кирмасов, 2011]. Согласно первой модели в зоне скола происходит одновременное разрастание трещин и их раскрытие [Durney, Ramsay, 1973]. Эта модель предусматривает, что жилы ведут себя как относительно более компетентные (вязкие) объекты. Они приобретают сигмоидальный изгиб за счет разной величины вращения, изменяющейся от центральной части жилы к окончаниям. Другими словами, при формировании жилы в сдвиговой зоне происходит ее вращение, а прорастание жилы на окончаниях происходит под одним и тем же углом к сдвиговой зоне.

Согласно второй модели [Nicolson, Eijofor, 1987] раскрытие жил происходит после формирования сколовых трещин за счет изгиба межжильных породных перемычек. В этом случае жилы выступают как относительно некомпетентные объекты, приобретающие сигмоидальную форму за счет искрив-

ления перемычек, разделяющих жилы. Конкретный механизм формирования кулисных жил можно установить при изучении морфологических особенностей жил и перемычек.

В известняках объекта Кугарчи системы кулисных жил, вероятно, сформировались вторым способом — за счет изгиба межжильных породных перемычек после образования сколовых трещин. Кулисные жилы в породах изученного обнажения часто имеют форму, близкую к ромбовидной (рис. 10, А, вверху). Такая форма обусловлена закономерным расположением трещин: отрывов — под углом, близким к  $45^\circ$ , и сколов Риделя ( $R$ ) — под острым углом к направлению сдвига (рис. 10, А, внизу). На этом примере можно описать один из механизмов формирования кулисных прожилков. В обстановке простого сдвига сначала, вероятно, сформировались сколы Риделя, которые при развитии деформации начали вращаться и при достижении угла  $\sim 45^\circ$  к направлению сдвига трансформировались в отрывы, которые сопровождалось новыми сколами Риделя. В этот момент и начали формироваться кулисные жилы, разделенные межжильными перемычками.

В кварц-кальцитовых жилах часто наблюдаются структуры, похожие на необычные разрывы (рис. 11). Вдоль них жилы имеют неровные, разорванные, «фьяммевидные» окончания. Таким образом создается визуальное впечатление, что «пластичные» жилы

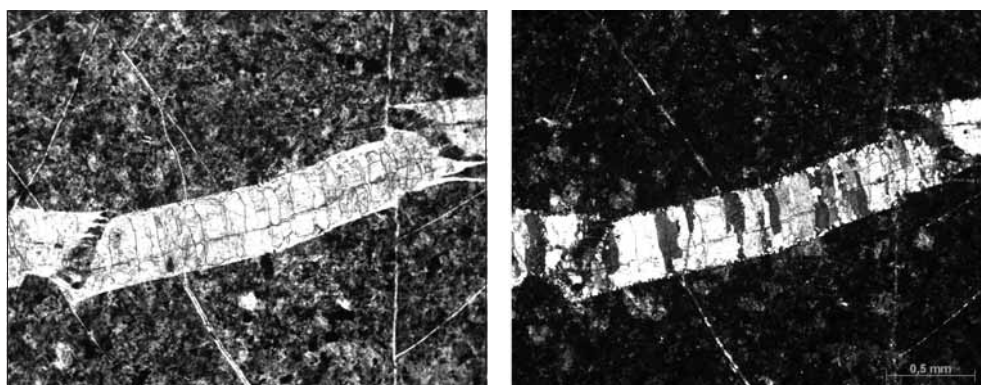


Рис. 11. «Фьяммевидные» структуры в торцах кварц-кальцитовых прожилков. Микрофотография, слева — николи параллельны, справа — николи скрещены

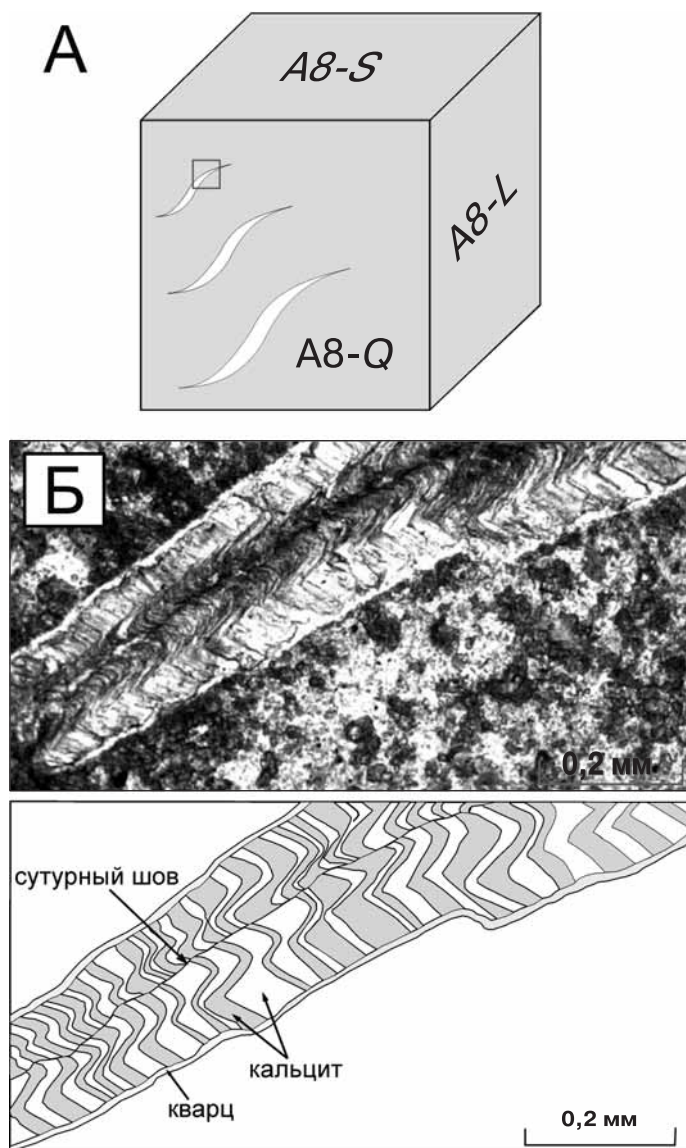


Рис. 12. Фрагмент кулисной жилы с изогнутыми волокнами: А — на грани ориентированного кубика (схема), Б — в шлифе (вверху микрофотография, николи параллельны, внизу схематическая зарисовка). Участок, соответствующий фото, показан черным контуром на рис. 9, в рамке

были разорваны, а пространство между ними заполнилось известняком. Вместе с тем это внешнее впечатление опровергается расположением кристаллов кальцита, которые практически не деформированы. Скорее всего, перемычки существовали изначально, а «фьяммевидные» окончания возникли позже, при изгибании междужильных перемычек и образовании в них серий трещин отрыва.

Примечательно, что именно изогнутые кулисные жилы часто сложены сильноизогнутыми кальцитовыми волокнами. В качестве примера на рис. 12, А схематично показан общий вид (форма) мелких кулисных жил на грани одного из ориентированных кубиков, перпендикулярной линии падения слоя, а на рис. 12, Б — микрофотография шлифа, изготовленного параллельно этой грани, и схематическая зарисовка жилы. Дж. Рэмси и М. Хабер [Ramsay, Huber, 1983]

объясняют образование таких микроструктур следующим образом (рис. 13). На начальной стадии имеются трещины отрыва, ориентированные перпендикулярно оси максимального растяжения (рис. 13, А). При изменении ориентировки растяжения краевые участки трещин, раскрывающиеся в это время, подстраиваются под действующее на них поле напряжений, тоже меняют свою ориентировку и изгибаются (рис. 13, В). Их раскрытие может продолжаться дальше в этом направлении. Однако чаще всего в такой системе появляются новые трещины отрыва, ориентированные ортогонально новой оси максимального растяжения и пересекающие более ранние жилы (рис. 13, В, 14). Со сменой ориентировки оси максимального растяжения связан и изгиб кристаллов внутри жилы (рис. 13, Г, Д, Е). Если интерпретировать строение изученных прожилков с этой позиции, то придется признать, что направление растяжения во время их формирования менялось примерно на  $90^\circ$ , причем по крайней мере два раза.

По представлениям А.Б. Кирмасова [2011], плоскостные минеральные жилы заполнения также являются структурами растяжения и указывают на деформацию удлинения под большими углами к жиле. Этот автор подчеркивает, что наиболее однозначно ориентировка удлинения фиксируется в случае волокнистых жил, какими представлено большинство жил, описанных нами. Вместе с тем в известняках Кугарчинской антиклинали встречаются и сложно-построенные прожилки, в которых присутствуют и кварцевая зона, и зона волокнистого кальцита, но отсутствует центральная сутурная линия, а внутренняя зона сложена неструктурированным кальцитом (рис. 15). В этих прожилках волокнистый кальцит не изогнут. Кроме того, встречаются прожилки, в которых зоны волокнистого кальцита отсутствуют. Такую ситуацию можно интерпретировать как следствие снятия напряжений на отдельных кратковременных этапах формирования прожилков, когда некоторые из них оставались еще открытыми.

**Заключение.** Анализ пространственной ориентировки и внутреннего строения плоскопараллельных минеральных жил позволяет составить общую картину распределения полей напряжения при формировании складчатого комплекса Кугарчи. Две главные системы минеральных жил и соответствующих им трещин отрыва ориентированы ортогонально одна относительно другой и определенным образом относительно локальных складок складчатого комплекса: во-первых, примерно параллельно поверхностям перегиба складок, а во-вторых, перпендикулярно их шарнирам. Судя по редким пересечениям, жилы второй системы более молодые (рис. 3). Соотношение этих жил с прожилками не совсем очевидно. Ориентировка по крайней мере части прожилков совпадает со второй системой. В этих прожилках кальцитовые волокна не изогнуты, т.е. они возникали, скорее всего, в последнюю очередь.



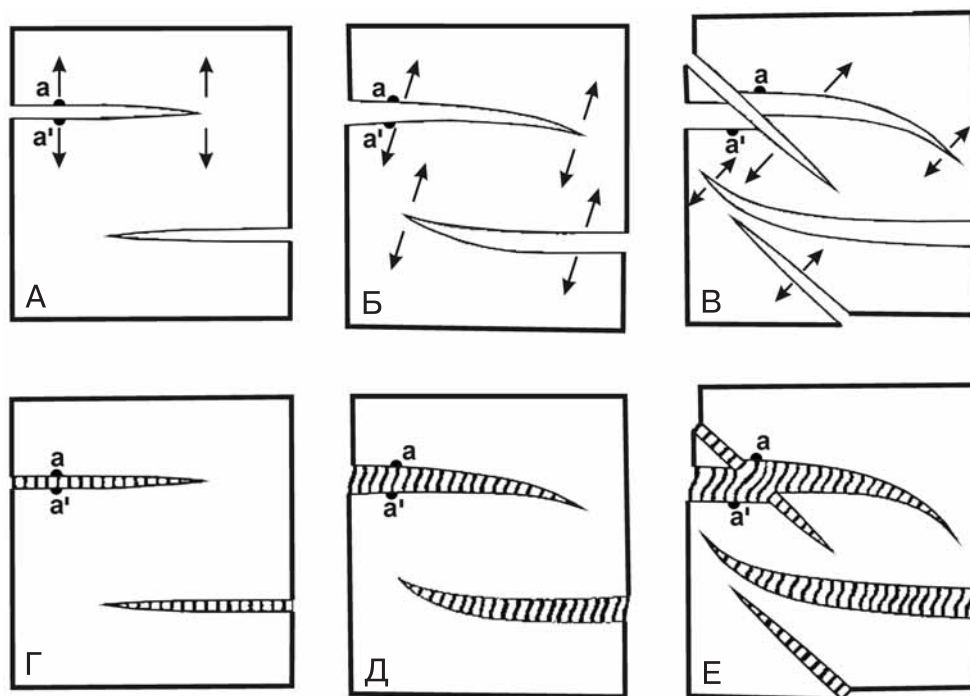


Рис. 13. Последовательность образования микроструктур, по [Ramsay, Huber, 1983]: А, Б, В — геометрия прогрессивно раскрывающихся трещин отрыва; Г, Д, Е — форма волокон минералов, образующихся в раскрывающихся трещинах в условиях изменения поля напряжения

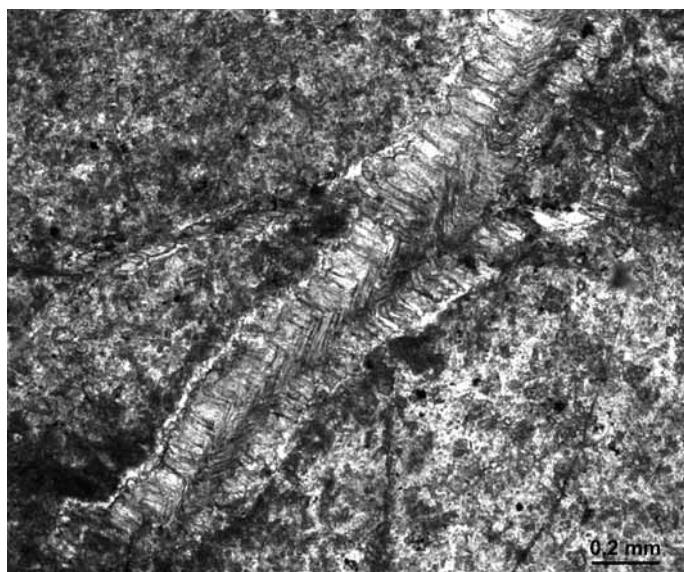


Рис. 14. Пример изменения ориентировок волокон кальцита и формирования вторичных изогнутых прожилков. Микрофотография, николи параллельны

Описанное расположение двух систем трещин отрыва соответствует двум направлениям растягивающих напряжений, участвовавших в формировании структуры: 1) вдоль осевой поверхности, перпендикулярно шарнирам складок и 2) вдоль шарниров складок. В обоих случаях сжатие было ориентировано ортогонально к осевой поверхности складок и существенно преобладало над растяжением. Исходя из этого можно предположить, что поле напряжений при формировании складчатой структуры Кугарчи

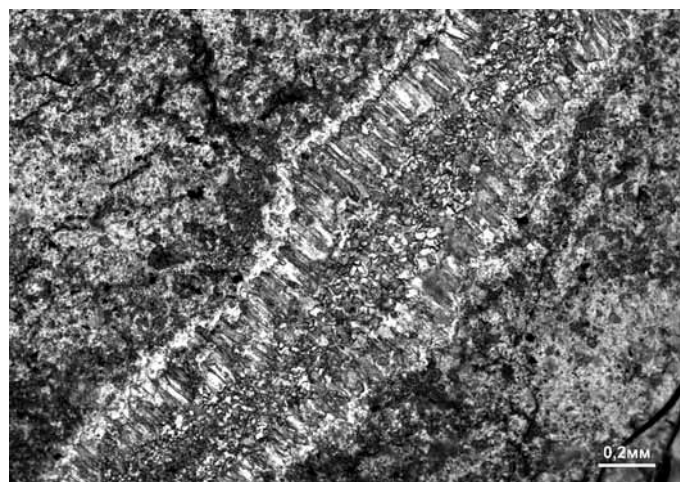


Рис. 15. Кварц-кальцитовый прожилок с внутренней зоной неструктурированного кальцита. Микрофотография, николи параллельны

существенно не менялось. Изменялось только главное направление растяжения — от вертикального до горизонтального. Изгибы волокон кальцита в прожилках, косо расположенных к направлению растяжения, также указывают на то, что оно довольно резко изменялось на перпендикулярное по крайней мере два раза (рис. 12). Зоны же неструктурированного кальцита в прожилках, вероятно, фиксируют моменты смены параметров поля напряжений.

Трудно представить, что этапы деформаций с разной ориентировкой направления растяжения разделялись значительными промежутками времени, поскольку при них формировались единые мало-мощные прожилки. Скорее всего, при постоянном

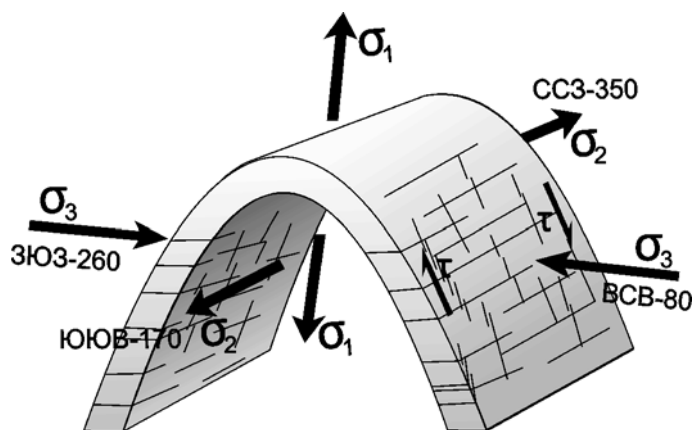


Рис. 16. Модель распределения главных нормальных ( $\sigma$ ) и тангенциальных ( $\tau$ ) напряжений при формировании складчатого комплекса Кугарчи ( $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — направления растяжения, которые, вероятно, менялись местами,  $\sigma_3$  — направление сжатия). Ось растяжения  $\sigma_1$  (иногда  $\sigma_2$ ) ориентирована субвертикально с небольшим отклонением (сверху — на север, снизу — на юг). Ось растяжения  $\sigma_2$  (иногда  $\sigma_1$ ) ориентирована в направлении ССЗ 350° — ЮЮВ 170° и полого наклонена на север (ССЗ 350°  $\angle$  10°). Ориентировка оси сжатия  $\sigma_3$  — ЗЮЗ 260° — ВСВ 80°

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Государственная геологическая карта Приуралья масштаба 1:200 000. Лист N-40-XXXIII. Объяснительная записка. М.: Госгеолтехиздат: 1950.

Кирмасов А.Б. Основы структурного анализа. М.: Научный мир, 2011.

Durney D.W., Ramsay J.G. Incremental strains measured by sintectonic crystal growths // Gravity and Tectonics. N.Y.: Wiley, 1973. P. 67–96.

направлении субширотного горизонтального сжатия максимальное и среднее главные напряжения были примерно одинаковы, т.е. фактически складчатая структура Кугарчи формировалась в обстановке, близкой к одноосному сжатию. При этом незначительно преобладающее растягивающее напряжение время от времени меняло ориентировку с горизонтальной на вертикальную (рис. 16).

Кулисное расположение поздних жил может быть свидетельством того, что складчатый комплекс Кугарчи подвергался не только горизонтальному сжатию, но и тангенциальным напряжениям, ориентированным вертикально и действовавшим в плоскости, перпендикулярной шарнирам складок. Под воздействием тангенциальных напряжений южная часть структуры смещалась вверх, а северная — вниз (рис. 16). Подтверждением этого служат наклонные шарниры складок, полого погружающиеся на северо-северо-восток (азимут 350°, угол 5–10°). С этими же напряжениями связано, вероятно, формирование косых кальцитовых жил.

Nicolson R., Ejiófor I.B. The three-dimensional morphology of arrays of echelon and sigmoidal, mineral-filled fractures: data from north Cornwall // J. Geol. London. 1987. Vol. 144. P. 79–83.

Ramsay J.G. Folding and fracturing of rocks. N.Y.: McGraw-Hill, 1967. 588 p.

Ramsay J.G., Huber M.I. The techniques of modern structural geology. Vol. 1. Strain Analysis. L.; N.Y.: Academic Press, 1983. 307 p.

Поступила в редакцию  
22.05.2013