

**1. Введение**

Микроструктурный анализ в геологии применяется в основном для реконструкции полей напряжений-деформаций самого высокого ранга, которые действуют в пределах небольших объемов минеральных агрегатов. Необходимым условием для реализации любой методики микроструктурного анализа является отбор ориентированных в пространстве образцов, для которых должна строго соблюдаться фиксация в пространстве в течение всего времени обработки каменного материала.

Главной задачей, решаемой с помощью традиционного микроструктурного анализа, является установление закономерностей пространственной ориентировки минералов на базе построения диаграмм ориентировок, обрабатываемых статистически на стереографических проекциях. На основе типизации узоров для одного минерала и различных минералов в полиминеральных образованиях, полученных на стереограммах, выявляются так называемые R-, S- и V-тектониты [2]. За время существования микроструктурного анализа была накоплена обширная база данных о пространственных ориентировках различных минералов и текстурно-структурных особенностях пород различного генезиса и состава. Однако главными проблемами классической методики микроструктурного анализа являются техническая сложность ее проведения (использование четырехосного столика Федорова), необходимость в получении большого количества данных, а также сложность и неоднозначность интерпретации этих данных. Значимый результат достигается только при объемных трудозатратах. Кроме того, многие исследователи из-за невозможности проведения однозначной интерпретации диаграмм признавали необходимость дальнейших полевых и лабораторных исследований особенностей структуры деформируемых толщ. Тем не менее, даже новые данные не позволяют в полной мере решить проблему теоретического обоснования интерпретации диаграмм различных ориентировок. Следовательно, интерпретация полученных микроструктурных данных не может быть проверена или верифицирована другими независимыми методами.

Это создает ограничение для распространения традиционной методики микроструктурного анализа.

Как альтернатива классической методике микроструктурного анализа П.Н. Николаевым был предложен динамический анализ микроструктурных ориентировок в качестве универсального метода решения тектонофизических задач [3]. Предложенный подход позволяет не только восстанавливать направления действия главных нормальных напряжений, но и определять тип деформации горных пород, а также в ряде случаев сделать более или менее обоснованные предположения о РТ-условиях, в которых протекала деформация. Но, как отмечал сам автор, данная методика также не получила широкого распространения из-за необычайной трудоемкости и наличия сложностей при трактовке получаемых диаграмм. Кроме того, при статистической обработке полученных результатов часть осей сжатия могла оказаться в пределах области действия растяжения (ранее установленной другими структурными методами) и наоборот.

Постепенно с развитием технологий и появлением новых методик в геологической науке, таких, как термобарогеохимия флюидных включений, электронная микроскопия, установление минералогических показателей давлений и температур, расширение геохимических и физико-химических задач, происходит также и развитие микроструктурного анализа. В последние годы в западной литературе публикуются результаты изучения особенностей (геометрические параметры, минеральное выполнение, соотношение между собой) микрообъектов горных пород в контексте изменения тектонической обстановки. Трещины и микротрещины, содержащиеся в массивах кристаллических пород, формируют пространство, доступное для фильтрации флюидов и миграции растворенных в них веществ на различные, нередко значительные расстояния. Поэтому установление последовательности образования трещин и микротрещин различных генераций дает возможность наметить соответствующие стадии тектонических движений, а также определить пути и этапы поступления флюидов, в том числе рудоносных,

в трещинно-поровое пространство. Так возникает специальная методика микроструктурного анализа, которая пока не получила широкого распространения в российской геологической науке. Основными задачами рассматриваемой методики являются выявление структурных особенностей линейных микрообъектов (микротрещин, разрывов, контактов минеральных зерен, включений, шлифов и др.) в ориентированных петрографических шлифах, а также установление закономерностей их распределения на площади рассматриваемого шлифа. В сочетании с методами структурной геологии, определением свойств палеофлюидов, которые «запечатываются» в микроструктурах как вторичные флюидные включения, микротермометрии и рамановской спектроскопии этих вторичных флюидных включений, сканирующей электронной микроскопии минерального выполнения микроструктур, а также привлечением данных по геодинамике и разрывной тектонике, специальная методика микроструктурного анализа значительно расширяет свои возможности. Благодаря применению комплекса методов становится возможным реконструировать пути и условия миграции гидротермальных растворов, устанавливать хронологию флюидопроницаемости пород, восстанавливать этапы эволюции трещинно-порового пространства и количественно рассчитывать фильтрационные характеристики различных типов горных пород в палео- и современных условиях и даже определять динамику изменения термобарических и физико-химических условий рудообразования на различных этапах тектогенеза.

Специальная методика микроструктурного анализа также трудоемка, поскольку на начальном этапе необходимо установить геометрические параметры (азимуты простираения, длины и апертуры) всех микроструктур, число которых может достигать в одном ориентированном шлифе до 3–4 тысяч штук. Данные измерения могут быть проведены с помощью оптического микроскопа, оборудованного столиком Федорова, но даже при высоком уровне сноровки исследователя процесс измерения геометрических параметров только одного объекта в таком случае займет длительное время. Поэтому при наличии микроскопа и ориентированных шлифов без применения каких-либо компьютерных средств автоматизации решение данной задачи является весьма сложным и проблематичным. В связи с этим возникла необходимость создания инструмента для реализации и автоматизации решения задач специальной методики микроструктурного анализа. Попытки создания подобного инструмента на основе разработки оригинального программного обеспечения (ПО) уже предпринимались некоторыми

зарубежными исследователями [13, 15]. Но данные разработки были закрыты для широкого круга исследователей и использовались исключительно учеными, их разработавшими, даже без возможности приобретения на коммерческой основе. Подобное положение дел вынудило авторов статьи искать другие выходы и возможности для автоматизации решения задач специальной методики микроструктурного анализа.

По сути, реализация начальных этапов рассматриваемой методики может быть представлена в качестве некоего картирования объектов (микроструктур) на площади шлифа, который играет роль «картографической» основы. Так как шлиф строго ориентирован по сторонам света, то у авторов возникла идея – почему бы для решения и автоматизации поставленных задач не воспользоваться ГИС-технологиями, имеющими в своем распоряжении обширный инструментарий для создания, привязки, векторизации и редактирования картографического материала, а также математические и другие приемы и методы решения различных пространственных задач. Напомним, что по территориальному охвату принято различать глобальные ГИС (global GIS), субконтинентальные ГИС, национальные ГИС, региональные ГИС (regional GIS), субрегиональные ГИС и локальные, или местные ГИС (local GIS). Благодаря примененному подходу картирования и анализа микрообъектов в шлифах с использованием ГИС-технологий, который будет описан ниже, мы фактически совершили переход от макро ГИС-проектов к абсолютно новому типу – микро ГИС (micro GIS). Кроме того, применение ГИС-технологий позволит фиксировать все отобранные образцы и структурные неоднородности на различных видах материалов и карт, а также одновременно проводить анализ не только микро-, но и макроструктур, выявленных на основе ранее проведенных исследований с привлечением данных топографических и тектонических карт, а также информации, полученной по космоснимкам. Появляется уникальная возможность сравнения (апскейлинга) структур и микроструктур на различных масштабных уровнях тектонодинамических систем, а также восстановления последовательности смены тектонических полей напряжений-деформаций различных рангов и времени формирования.

## 2. Методология

Двумерные фотографии ориентированных шлифов, которые в дальнейшем будут подвергнуты микроструктурному картированию, могут быть получены с помощью оптического микроскопа, оборудованного цифровой камерой. В нашем случае использовался микроскоп Olympus VX-51 с цифровой

камерой Olympus Camedia C7070zoom. Как уже отмечалось выше, для полноценной «привязки» в ГИС-проекте микронеоднородностей и определения их геометрических параметров (азимут простираения, длина, апертура) все изучаемые шлифы должны быть строго ориентированы в пространстве. Это требование нужно также учитывать при получении фотографий отдельных секций ориентированного шлифа. Собранные из отдельных секций фотомозаики обязательно должны быть снабжены масштабной линейкой.

Ввиду специфической направленности на изучение преимущественно микроструктур, стояла необходимость, чтобы используемое ПО могло реализовывать и автоматизировать следующие основные действия:

1. Осуществление «привязки» растров (фотографий) отдельных секций (участков) шлифа, а также их «сбивки» и «стыковки» в одной системе относительных координат.
2. Определение относительных координат X и Y любой точки секции и шлифа в целом.
3. Маркировка всех присутствующих в шлифе микроструктур.
4. Автоматическое определение и измерение геометрических параметров микроструктур (азимут простираения, длина, апертура).
5. Выявление различных систем и генераций микротрещин и микроструктур в зависимости от значений азимутов и осуществление их отдельной маркировки.
6. Возможность маркировки объектов по типам (микротрещины, выполненные вторичными флюидными включениями, открытые или частично минерализованные микротрещины, а также микротрещины, выполненные рудным веществом).
7. Маркировка микроструктур по возрасту и генезису.
8. Расчет фильтрационных характеристик – пористости и проницаемости в палео- и современных условиях на различных этапах деформации геологических тел для каждой секции и шлифа в целом.
9. На основе собранных данных определение количественных и процентных соотношений различных типов микроструктур, представление результатов в виде простых диаграмм (графики, розы-диаграммы, гистограммы).

Среди всего рассмотренного авторами ПО, позволяющего создавать и редактировать ГИС-проекты, не было найдено ни одного, способного стандартными средствами реализовать все поставленные задачи. Поэтому был принято решение

воспользоваться программой ArcView 3.2 компании ESRI, являющейся мировым лидером и общепринятой отраслевой геоинформационной системой в России. Преимуществом в выборе данной программы являлось то, что ArcView 3.2 включает в себя внутреннюю среду разработки – объектно-ориентированный язык программирования Avenue, который применяется для написания различных скриптов и программных модулей, позволяющих расширить базовый функционал ArcView. Именно данный язык программирования, ввиду своей простоты, использовался авторами для дополнения и разработки необходимых функций применительно к анализу микроструктур. Таким образом, был создан программный модуль, интегрированный с ГИС, возможности которого были направлены на автоматизацию специальной методики микроструктурного анализа [7].

При создании программного модуля, интегрированного в ГИС, есть свои весомые плюсы, в отличие от создания самостоятельного программного продукта:

1. Прежде всего, возможность создания необходимых модулей, редактирования и отладки программного кода одним человеком, а не группой разработчиков.
2. Простота программного кода и сокращение времени на разработку и отладку модуля или скрипта.
3. Наличие изначально обширного инструментария для привязки, редактирования и векторизации карт и растров.
4. Возможность послойного маркирования различных типов структурных элементов (микротрещин и их систем, открытых трещин или трещин, выполненных флюидными включениями), их разделения по возрасту и генезису.
5. Возможность привязки в ГИС-проекте каждого отдельного шлифа к макро ГИС-проекту карты фактического материала, геологической, тектонической, геофизической, гидрогеологической и других видов карт различного масштаба для проведения наглядного сравнительного анализа параметров структур на различных масштабных уровнях.
6. Создание полноценной СУБД (Системы Управления Базами Данных) с дальнейшим экспортом значений для обработки другими программными продуктами.

Ниже последовательно приведены задачи, которые решали авторы в процессе создания программного модуля, а также рассмотрены основные алгоритмы их решения, заложенные в программный код.

### 3. Разработка программного модуля и применение ГИС-технологий для решения задач специальной методики микроструктурного анализа

#### 3.1. Привязка растров отдельных секций шлифа

Первым важным действием при разработке описываемого программного модуля для расширения базового функционала ArcView являлась реализация возможности по привязке растров (фотографий) отдельных секций ориентированного шлифа. Изображения шлифов должны иметь как можно большее разрешение, необходимое для выявления всех микроструктур. Поэтому фотографирование шлифа проводилось отдельными увеличенными участками (секциями). Фотографии секций получаются за счет смещения объектива микроскопа на определенное расстояние так, чтобы из полученных в результате фотографий секций можно было собрать «мозаику», отражающую площадь всего шлифа. В связи с этим разрабатываемый модуль должен осуществлять «сбивку» и «стыковку» всех секций в одной системе относительных координат.

К сожалению, ArcView не содержит инструментов для привязки растровых изображений. Однако реализовать привязку можно, например, воспользовавшись бесплатными скриптами, которые доступны для скачивания с официального сайта компании ESRI. Но все же, удобнее пользоваться одним инструментом, в котором будут заложены все необходимые возможности для изучения и анализа микротектоники, ориентировки микроструктур и микротрещин, нежели огромным набором инструментов, каждый из которых осуществляет только по одной необходимой функции. Другими словами, перед авторами стояла задача создания модуля, который бы сочетал в себе все необходимые инструменты для изучения типов, параметров и пространственной ориентировки микроструктур. Поэтому при создании модуля в него была заложена функция привязки растров секций шлифов в относительной системе координат. Эта функция осуществляется за счет автоматического редактирования файла геопривязки. Геопривязка растра фиксируется в так называемом «world-файле». Это текстовый файл с именем как у растра, но с другим расширением: \*.tfw для \*.tif, \*.brw для \*.bmp и так далее. Или же к расширению файла добавляется буква «w» – bmpw, tifw, jpgw, jpegw, tiffw и т.п. Если world-файл открыть стандартным windows-приложением «блокнот», то мы увидим всего шесть строк:

- 1) размер пиксела на местности, по оси X;
- 2) параметры поворота;

- 3) дополнительные параметры поворота;
- 4) размер пиксела на местности, по оси Y;
- 5) реальная x-координата верхнего левого угла изображения;
- 6) реальная y-координата верхнего левого угла изображения;

Если растр уже сопровождается таким файлом, то значит, он геопривязан и подгрузится сам в нужное место, в нужной системе координат. Поэтому необходимо, чтобы наш модуль автоматически создавал и редактировал файлы геопривязки растра каждой секции для составления правильной «мозаики» всего шлифа.

Для привязки фотографий шлифов и решения дальнейших задач нам фактически ничего не надо знать о географической проекции (как для карты). Более того, мы можем выбрать любую удобную для нас систему координат, в которой в дальнейшем будут привязаны все секции шлифа. Условные координаты вычисляются исходя из длины и высоты растра в пикселах. Для привязки каждой новой секции шлифа осуществляется перевод X и Y координат ее углов так, чтобы восстановить полную мозаику шлифа из изображений. Значения смещений по X, Y осям определяются автоматически (рис. 1). Благодаря такому подходу все значения X и Y секций ссылаются на одну общую систему координат, что необходимо для воссоздания полного изображения шлифа из секций.

#### 3.2. Маркировка микрообъектов

Маркировка объектов производится непосредственно исследователем после осуществления привязки всех секций и получения полного изображения шлифа. Для этого используется стандартный инструмент ArcView «Прямая линия» (Line). В процессе маркировки создается отдельная векторная тема, куда заносятся новые объекты (прямые линии). Прямые линиями отмечаются линейные участки каждой микротрещины. Исходя из навыков оператора, микротрещины сразу могут быть отмечены разными цветами в зависимости от морфогенетического типа (открытые и в различной степени минерализованные микротрещины, трещины скола, микротрещины, выполненные вторичными флюидными включениями и т.д.) (рис. 2).

В результате реализации данного действия мы получаем определенное количество микрообъектов шлифа в виде векторных прямых линий. Подобный подход маркировки микрообъектов гораздо эффективнее и занимает в разы меньше времени, чем замеры ориентировки микроструктур с помощью столика Федорова. Ведь необходимо только отметить микрообъекты, а остальные действия

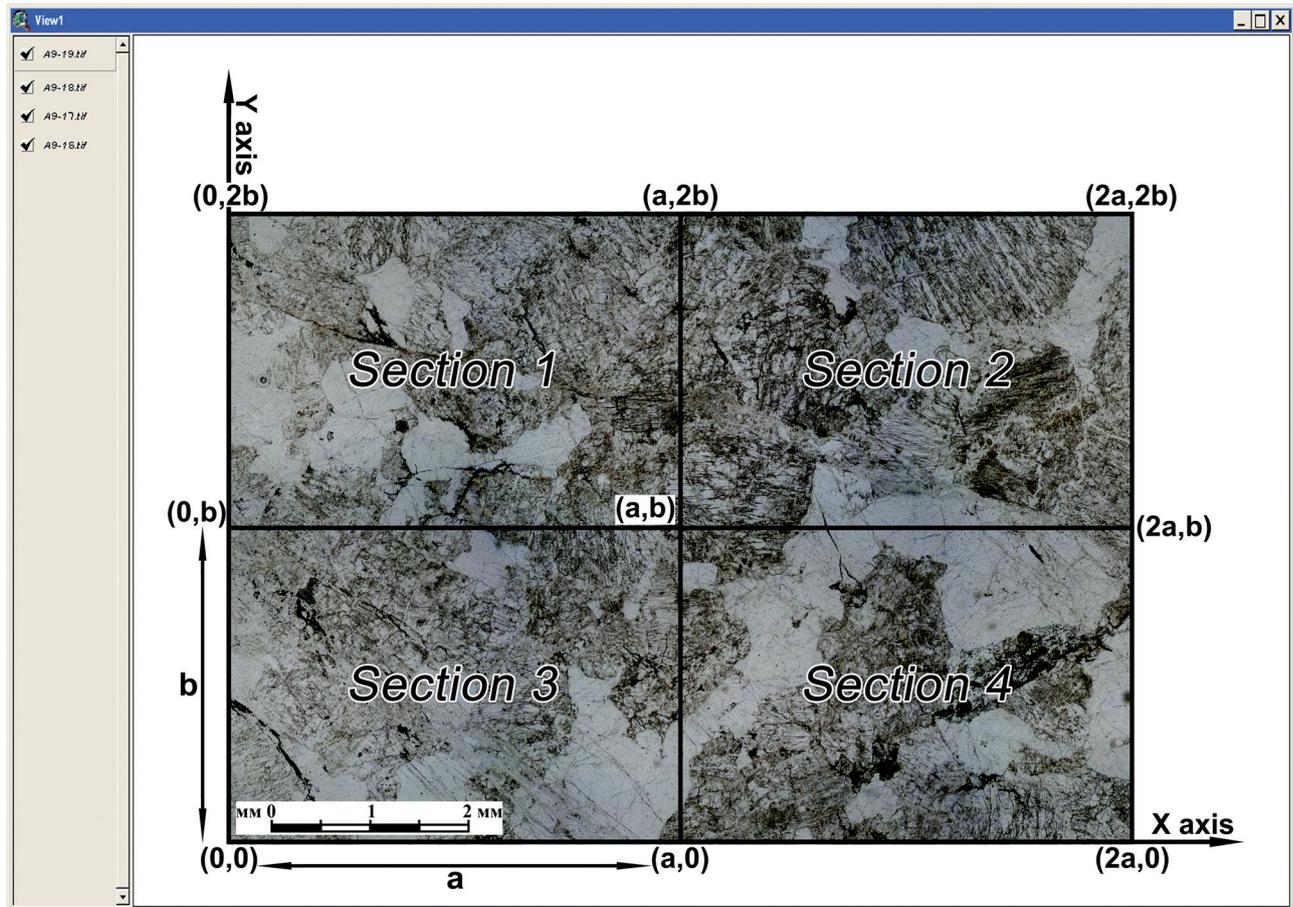


Рис. 1. Результат привязки четырех смежных секций шлифа (a – длина секции в пикселах по оси X, b – длина секции в пикселах по оси Y)

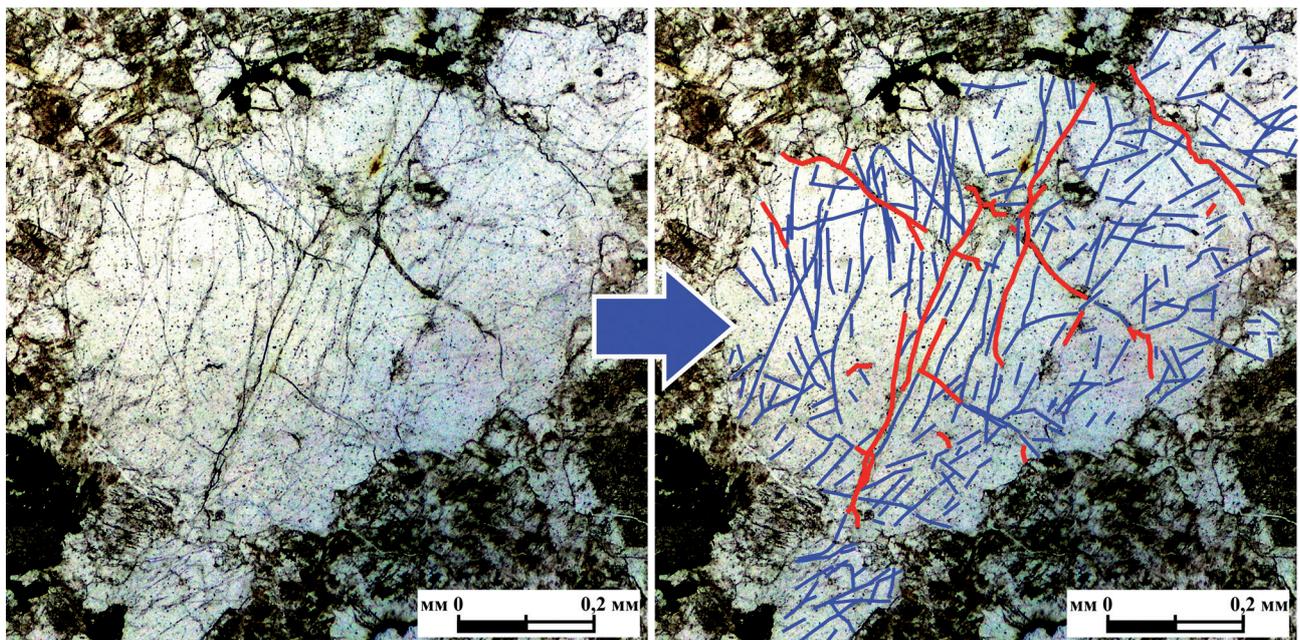


Рис. 2. Результат маркировки микроструктур (микротрещин) в шлифе на примере зерна кварца. Красным помечены микротрещины открытые или заполненные рудным веществом, а синим – микротрещины, захватившие флюидные включения

и расчеты произведет автоматически разрабатываемый модуль.

### 3.3. Определение относительных координат X и Y

Следующая важная функция, которой необходимо «обучить» наш модуль, – это определение относительных координат в любой точке на площади шлифа. Это позволило бы иметь координаты концов маркированных линейных микроструктур, а также с помощью реализации несложных автоматических вычислений рассчитывать их геометрические параметры (азимут простирания, длину, апертуру). В ArcView 3.2 для того, чтобы узнать координаты произвольной точки, существует несколько способов.

Самый простой способ узнать координаты произвольной точки на плоскости – поставить графический объект «точка» (или точку в точечной теме) в нужном нам месте и, удерживая правую кнопку мыши, выбрать пункт «shape properties» (свойства объекта). Координаты точки будут показаны в строке вида: «Point: X Y», где X Y и будут искомые координаты (рис. 3). Наши координаты будут выражены соответственно в пикселах. Но данный способ, ввиду огромного количества объектов, требует очень много времени и ничуть не автоматизирует работу пользователя.

Другой способ – после маркировки всех микротрещин включить возможность редактирования столбцов атрибутивной таблицы и с помощью инструмента «калькулятор» применить команду получения координат для каждого типа объектов. Но это действие также отнимает достаточно много времени.

Поэтому наш скрипт был доработан так, чтобы при маркировке микротрещин графическим объектом «линия» все микроструктуры в качестве полилиний заносились бы в отдельную векторную тему, а координаты концов каждой трещины автоматически вычислялись и записывались в атрибутивную таблицу (рис. 4). В итоге мы формируем таблицу с координатами крайних точек каждого линейного участка микроструктуры для дальнейшего расчета ее геометрических параметров.

### 3.4. Определение геометрических параметров микроструктур

Далее, чтобы реализовать в программном коде нашей программы возможность расчета геометрических параметров выявленных микротрещин, при наличии координат концов каждого линейного участка объекта, необходимо чуть подробнее разобраться в каждом определяемом параметре.

Итак, мы имеем две крайние точки каждого линейного участка объекта и их координаты, например  $A\{X_1, Y_1\}$  и  $B\{X_2, Y_2\}$ . Поэтому вычислить длину линейного участка микротрещины или ее апертуру и заложить алгоритм расчета в программный код не составляет труда. Из школьного курса геометрии расстояние между двумя точками равно:

$$AB = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

Под азимутом простирания в геологии понимается угол между географическим меридианом и линией простирания, отсчитываемый по часовой стрелке. Простирание объекта может определяться двумя азимутами, отличающимися на  $180^\circ$ . На практике указывается только один из них.

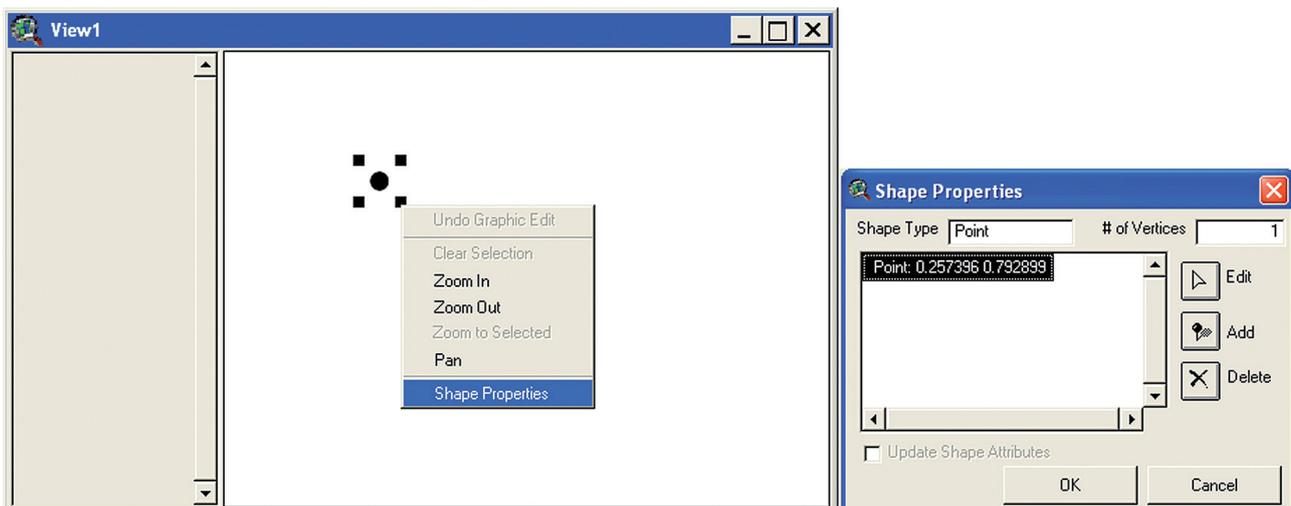


Рис. 3. Прием создания графического объекта «точка» для определения координат произвольной точки на плоскости

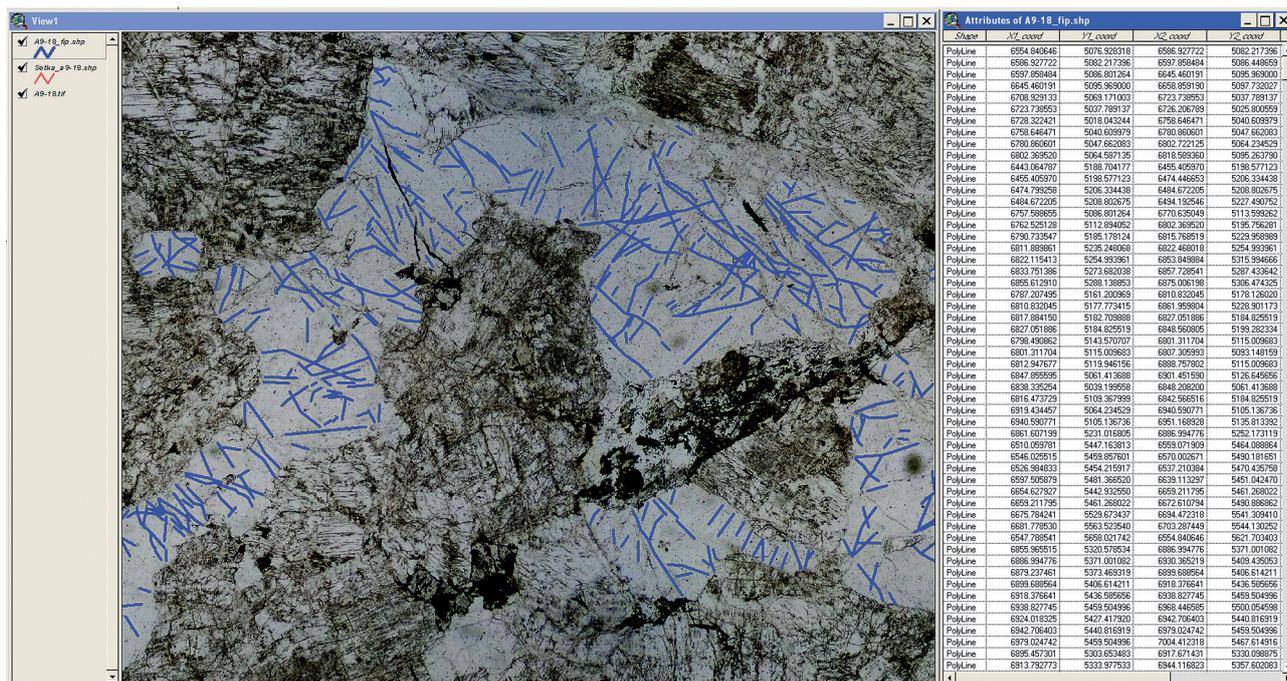


Рис. 4. Результат реализации действий разработанного модуля по определению координат концов каждой микротрещины (линейного сегмента). Все микроструктуры в качестве полилиний заносятся в отдельную векторную тему, а координаты концов каждой трещины автоматически вычисляются и записываются в атрибутивную таблицу

Так как мы имеем две крайние точки линейного пересечения участка микротрещины с плоскостью шлифа с известными координатами, то будем считать, что азимут простирания, взятый из одной точки на другую, – это угол отклонения прямой, полученной соединением двух данных точек (А и В) от прямой, проведенной на север из точки номер один. Угол считается по часовой стрелке. В нашем случае для реализации специальной методики микроструктурного анализа необходимо, чтобы ориентированный шлиф на столике микроскопа был расположен так, чтобы северное направление как можно точнее совпадало с вертикальной осью Y. Или же перед маркировкой микротрещин необходимо в любом, позволяющем это действие, графическом редакторе просто повернуть растр на величину отклонения северного направления от вертикали.

Поскольку шлиф ориентирован так, что вертикальная ось Y совпадает с северным направлением, то азимут может быть определен из прямоугольного треугольника, где точки А и В будут вершинами, ограничивающими гипотенузу, а точка С {X2, Y1} – вершиной при прямом угле (рис. 5). Исходя из теоремы косинусов и теоремы Пифагора получаем выражение для определения острого угла при вершине А рассматриваемого прямоугольного треугольника:

$$BC^2 = AB^2 + AC^2 - 2AB \cdot AC \cdot \cos\beta,$$

$$AB^2 = AC^2 + BC^2 \text{ (так как треугольник прямоугольный),}$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{AC}{AB}\right).$$

Однако, прежде чем определить сам азимут простирания и заложить данную формулу в алгоритм для определения азимута по двум точкам, необходимо учесть, что данные точки могут быть по-разному расположены на плоскости относительно друг друга. Существует 4 возможных варианта, зависящих от взаимного расположения точек А и В. В данном примере мы определяем азимут от точки А на точку В, разность координат по оси абсцисс  $\Delta X = X1 - X2$ , разность координат по оси ординат  $\Delta Y = Y1 - Y2$ :

1. Точка В находится выше и правее точки А, т.е.  $\Delta X < 0, \Delta Y < 0$  (рис. 5а), тогда азимут  $(\alpha) = 90 - \beta$ .
2. Точка В находится ниже и правее точки А, т.е.  $\Delta X < 0, \Delta Y > 0$  (рис. 5б), тогда азимут  $(\alpha) = 90 + \beta$ .
3. Точка В находится ниже и левее точки А, т.е.  $\Delta X > 0, \Delta Y > 0$  (рис. 5в), тогда азимут  $(\alpha) = 270 - \beta$ .
4. Точка В находится выше и левее точки А, т.е.  $\Delta X > 0, \Delta Y < 0$  (рис. 5г), тогда азимут  $(\alpha) = 270 + \beta$ .

Учитывая эти взаимные расположения рассматриваемых точек, программный код был доработан для вычисления длин и азимутов простирания выявленных микротрещин и успешно протестирован на большом количестве объектов. В результате

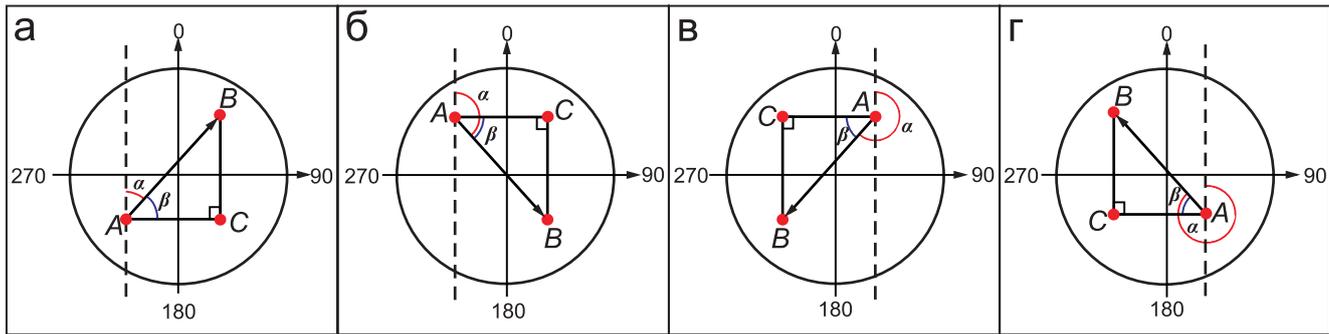


Рис. 5. Варианты расположения точек на плоскости относительно друг друга для вычисления азимута простирания ( $\alpha$ ): а) точка В находится выше и правее точки А ( $\alpha = 90 - \beta$ ), б) точка В находится ниже и правее точки А ( $\alpha = 90 + \beta$ ), в) точка В находится ниже и левее точки А ( $\alpha = 270 - \beta$ ), г) точка В находится выше и левее точки А ( $\alpha = 270 + \beta$ )

работы данной модификации модуля в уже сформированную таблицу с координатами концов каждой микротрещины добавляются поля, заполненные автоматически вычисленными значениями длин и азимутов (рис. 6). Азимут считается в градусах, а длина в относительных значениях (пикселях).

### 3.5 Выявление и маркировка различных систем и генераций микротрещин

Для того чтобы разрабатываемый программный модуль имел возможность определять и разделять системы и генерации микротрещин, необходимо разобраться в критериях выявления данных систем, а также в функциях и возможностях программы ArcView, которые будут полезны для реализации данной задачи.

Чтобы отнести ту или иную микротрещину к определенной системе и генерации, нам необходимо обратить внимание на атрибутивную таблицу, где расположены данные об азимуте и длине векторизованных линейных участков микротрещин. Данную таблицу мы получили благодаря реализации предыдущего действия нашего программного модуля. В таблице мы видим значения азимутов простирания для различных микротрещин (см. рис. 6). Критерием для отнесения микротрещин к той или иной системе будем считать небольшую разницу в значениях азимута, например в  $10^\circ$ . Теперь нам необходимо воспользоваться стандартным инструментом ArcView для атрибутивных таблиц – Конструктор Запросов (Query Builder) (рис. 7). С помощью данного инструмента пользователь может осуществлять выборку строк по значениям определенного поля. Можно делать сложные запросы не только по одному, но и по нескольким параметрам сразу, искать строки, удовлетворяющие различным характеристикам в совокупности. В нашем случае мы собираемся создать выборку по полю «Azimuth». В качестве примера определимся

с первой системой микротрещин. По таблице легко заметить, что значения азимутов некоторых микротрещин находятся около значений  $10-15^\circ$ . Вероятно, что все эти микротрещины относятся к одной системе. Но это необходимо проверить – запускаем Query Builder, вводим следующий запрос «([Azimuth] >= 9) and ([Azimuth] <= 16)», то есть мы хотим, чтобы программа выбрала строки со значениями азимутов больше или равно 9 и меньше или равно 16. Нажимаем кнопку «New Set» (Новая Выборка). В итоге мы получаем атрибутивную таблицу с подсвеченными строками, удовлетворяющими заданным параметрам значений азимута. Более того, каждая строка данной атрибутивной таблицы является отражением соответствующего графического объекта векторной темы (линейного участка микротрещины), поэтому графические объекты, соответствующие значениям азимута по выборке, также будут выделены желтым цветом (см. рис. 7).

Подобные действия позволяют наглядно проверить предположения о принадлежности тех или иных микротрещин к определенной системе, анализируя не только величину азимута, но и непосредственно фотографию шлифа, а также взаимное расположение трещин. Далее, если выявленные микротрещины совпадают с нашими представлениями о принадлежности к одной системе или генерации, то для общей маркировки и дальнейшего анализа их нужно объединить в один слой.

Все описанные выше действия могут отнимать у пользователя значительное количество времени, поэтому они были автоматизированы и реализованы в программном коде рассматриваемого модуля. Программа автоматически определяет строки атрибутивной таблицы и сравнивает значения азимутов каждой микротрещины. Объекты с близкими значениями азимутов (критерий в разности значений азимутов определяется пользователем) группируются в один слой и маркируются определенным цветом.

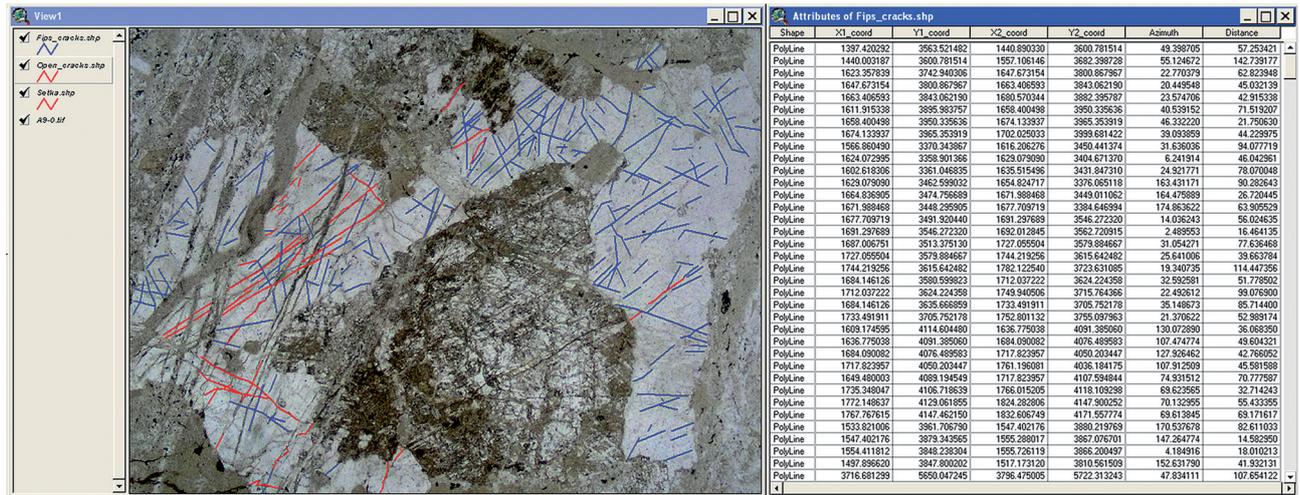


Рис. 6. Результат реализации действий программного модуля для расчета азимута простирания и длин микротрещин. В атрибутивную таблицу с координатами концов каждой микротрещины добавляются поля, заполненные автоматически вычисленными значениями азимута простирания (поле «Azimuth») и длин (поле «Distance»)

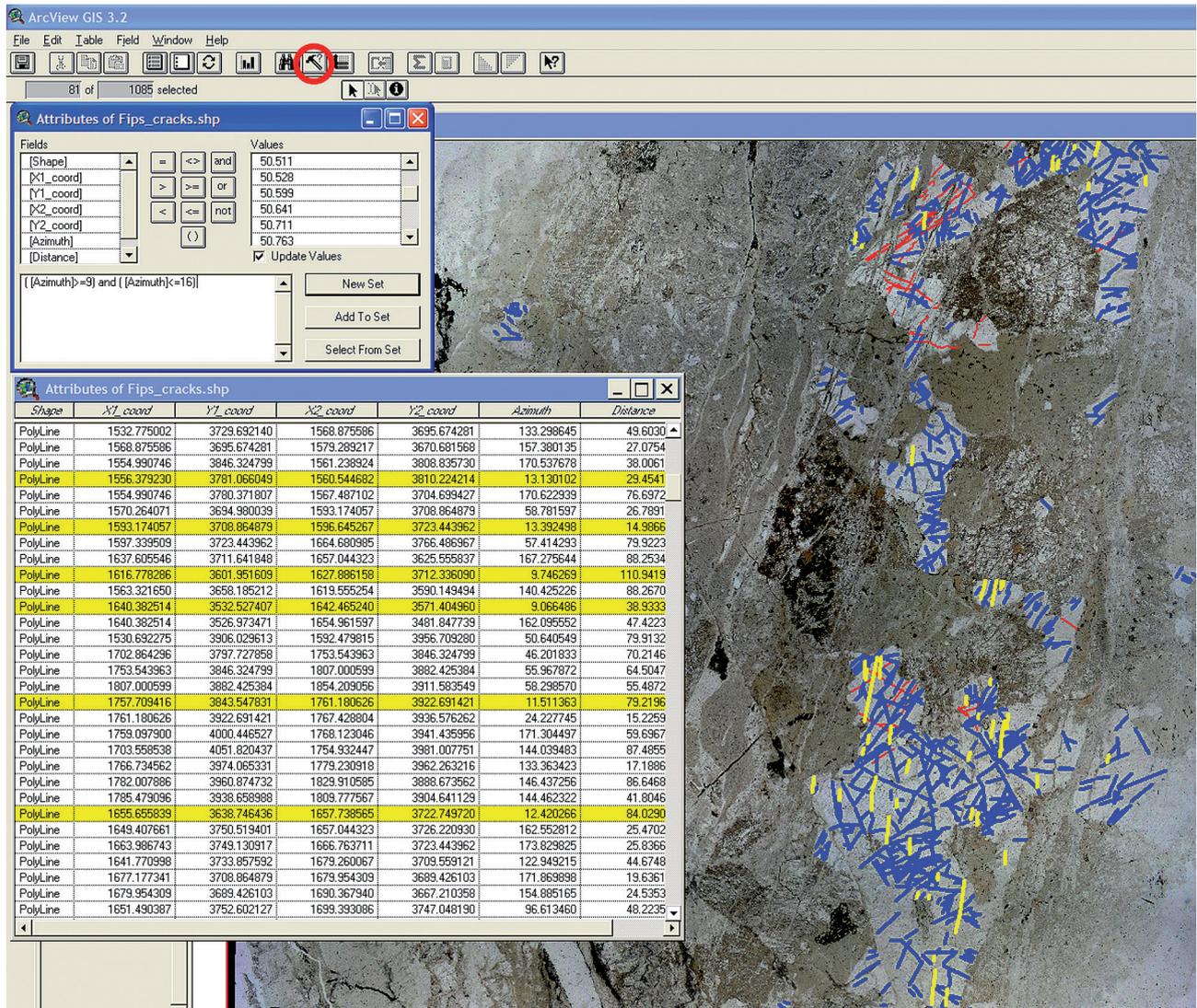


Рис. 7. Расположение кнопки «Query Builder» на панели инструментов ArcView (красный кружок); интерфейс конструктора запросов (Query Builder); атрибутивная таблица с подсвеченными строками, удовлетворяющими заданным параметрам значений азимута, и подсвеченные графические объекты активной темы, являющиеся отражением выбранных строк атрибутивной таблицы

На начальной стадии тестирования возможности выявления систем и генераций микротрещин авторским программным модулем анализировались растры, которые были созданы в графическом редакторе (для упрощения процесса отладки скрипта), а не реальные фотоснимки шлифов. Растры создавались так, чтобы они включали как минимум три системы микротрещин. Использование описанного выше способа определения принадлежности той или иной микротрещины к определенной системе и генерации позволило с легкостью выявить все три системы. В результате работы скрипта каждая система была представлена отдельным слоем, включающим определенное количество объектов (линейных участков микротрещин), со своей атрибутивной таблицей, содержащей значения азимутов и длину трещин.

На завершающем этапе тестирование проводилось на реальных фотографиях шлифов. В процессе тестирования разработанный модуль проявил себя отлично, выявляя различные системы и генерации микротрещин за считанные секунды.

### 3.6. Представление результатов, построение диаграмм

Наиболее простым способом представления результатов замера пространственных параметров микроструктур является построение роз-диаграмм трещиноватости. Они очень наглядны, но дают представление лишь об одном каком-то элементе залегания – либо простирании, либо направлении падения. Такие диаграммы можно использовать

в тех случаях, когда углы падения трещин различаются незначительно и близки к  $90^\circ$ .

Предлагаемая методика специального микроструктурного анализа, к сожалению, не имеет средств и способов измерения углов падения различных типов микротрещин, так как измерение пространственных параметров микротрещин проводится в горизонтальной плоскости ориентированных шлифов. Однако для восстановления осей главных нормальных напряжений, реконструкции особенностей внутрирудной тектоники, выявления этапов флюидопроницаемости пород в зависимости от этапов деформации в соответствии с методикой достаточно иметь значения рассматриваемых параметров.

Возможности разрабатываемого программного модуля были расширены за счет реализации автоматического построения роз-диаграмм (рис. 8) и гистограмм зависимости длин микротрещин от их азимута простирания. При этом в ArcView 3.2 функция построения роз-диаграмм отсутствует. Результат построения данных диаграмм позволяет визуально оценить характер распределения простираний выбранных линейных объектов.

При разработке возможности построения роз-диаграмм авторами учитывалось не только количество линейных объектов, имеющих ту или иную ориентировку, но и их общая протяженность, то есть длины лучей роз-диаграмм по различным направлениям пропорциональны не количеству объектов, а сумме длин микротрещин данных

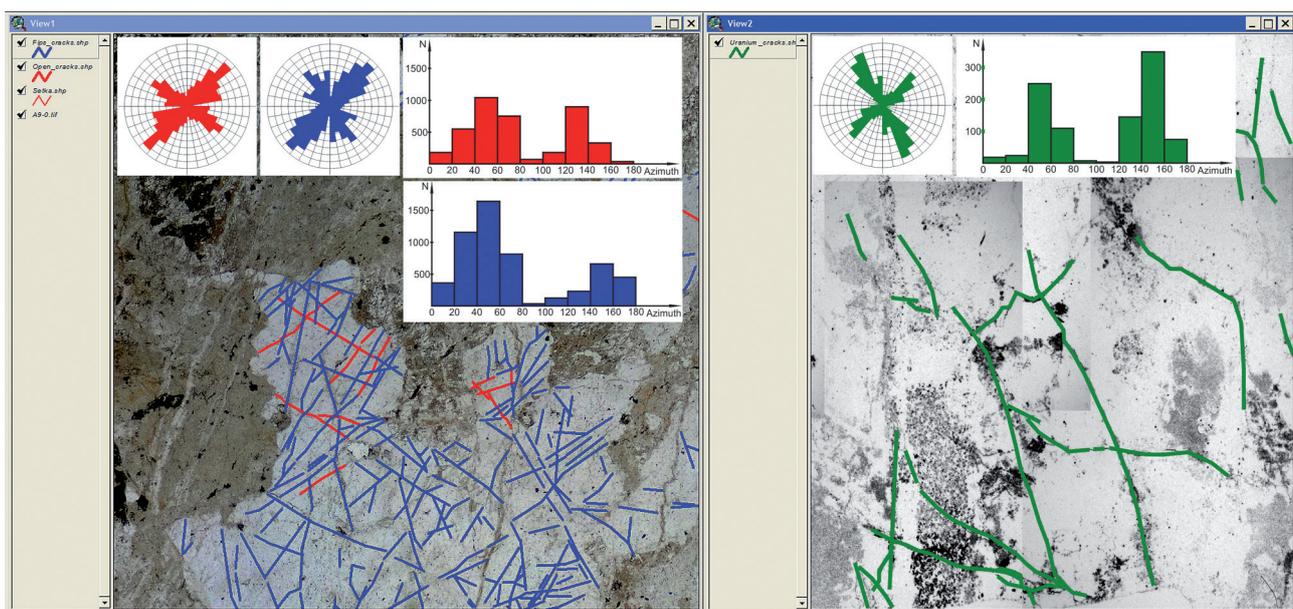


Рис. 8. Пример построения роз-диаграмм и гистограмм с помощью разработанного модуля для различных типов микроструктур. Красным помечены открытые микротрещины, синим – микротрещины, выполненные вторичными флюидными включениями, зеленым – линейные урановые скопления на лавсане (осколковая радиография), приуроченные к микротрещинам

интервалов простираций. Эта важная деталь анализа позволяет оценить выраженность и значимость на площади определенных генераций микротрещин и косвенно позволяет сравнить величины проявления различных деформаций.

### 3.7. Расчет фильтрационных характеристик

Фильтрационные характеристики пород (пористость и проницаемость) в палео- и современных условиях на различных этапах деформации пород могут быть определены количественным методом, предложенным французскими исследователями [14] и основанном на упрощении отношений, выведенных ранее для оценки фильтрационных свойств пород [12]. Этот подход в совокупности со специальной методикой микроструктурного анализа можно использовать для анализа и определения количества генераций микротрещин как функцию их ориентировки. Данная техника является простым и быстрым методом для оценки пористости и трещинной проницаемости, которые проявляются в определенное время истории горных пород.

Пористость для потока флюидов определялась количественно реконструкцией первоначальной сети трещин, аппроксимированных как диски. Сегмент трещины, наблюдаемой в пересечении с поверхностью шлифа, естественно, короче, чем диаметр диска. Однако для упрощения предполагается, что максимальная длина трещины соответствует диаметру диска. Если представить, что все открытые микротрещины, образовавшиеся на определенном этапе деформаций, взаимосвязаны, то можно использовать эквивалентную трещину с совокупной длиной диаметра диска. На основании этого предположения первоначальная пористость может быть определена количественно:

$$\Phi = \frac{L \cdot \pi \cdot e}{S},$$

где  $\Phi$  – эффективная пористость,  $L$  – совокупная длина определенной системы трещин,  $S$  – площадь изучаемой поверхности,  $e$  – апертура системы трещин [13].

Определение трещинной проницаемости также основано на предположении, что все трещины связаны и могут быть аппроксимированы дисками с апертурой, эквивалентной толщине трещин. Для простоты будем считать, что трещины падают перпендикулярно плоскости изучаемой секции и формируют неоднородную систему. Это упрощение позволяет определить значение микротрещинной проницаемости ( $K_f$ ):

$$K_f = \frac{(\varepsilon \cdot \pi \cdot N_f \cdot c^2 \cdot e^3)}{12},$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент шероховатости стенок трещин,  $N_f$  – объемная плотность трещин для системы  $f$ ,  $c$  – среднее значение половины длины трещин,  $e$  – апертура.

Объемная плотность может быть определена, если известна поверхностная плотность и половина длины всех трещин [11]:

$$N_f = \frac{2}{(S \cdot \pi \cdot c \cdot \sin \theta)},$$

где  $\theta$  – угол падения каждой трещины. Предполагается, что трещины перпендикулярны к плоскости шлифа, тогда  $\sin \theta = 1$ . Таким образом, формула для  $K_f$  может быть упрощена:

$$K_f = \frac{(\varepsilon \cdot c \cdot e^3)}{6S},$$

где  $K_f$  – проницаемость общая или директивная (для определенной системы трещин), выраженная в м<sup>2</sup> или в дарси (1 дарси = 0,987·10<sup>-12</sup> м<sup>2</sup>).

Представленные формулы расчета пористости и проницаемости для палеопотока флюидов были заложены в программный код разработанного авторами программного модуля для реализации специальной методики микроструктурного анализа.

### 3.8. Перевод условных длин микроструктур в реальные величины

Так как при специальной методике микроструктурного анализа для расчетов используются в основном соотношения длин различных генераций микротрещин, то для авторов не было необходимости определять реальные значения протяженности микроструктур. Достаточно было иметь размер в условных единицах изображения – пикселах (при условии, что все снимки секций шлифа, получаемые с помощью микроскопа и цифрового фотоаппарата, сделаны при одинаковом разрешении и имеют одинаковый размер). Однако при необходимости реальные величины в единицах СИ могут быть легко вычислены. Именно для этой цели нужна масштабная линейка на фотографиях шлифов.

Масштаб для изображений шлифов – это не что иное, как размер пиксела в единицах шлифа. Чтобы узнать размер пиксела в метрической системе, в разрабатываемый модуль необходимо заложить возможность измерения части масштабной линейки на изображении с помощью инструмента «прямая линия». Пользователь должен данным инструментом измерить единицу длины в пикселах, то есть какую-то часть, или всю масштабную линейку. Например, после измерения получилось, что 1 миллиметр шлифа содержит по длине 115 пикселов, а значит необходимо разделить 1 на 115 и получается, что один пиксел равен 0,0087 мм, или 8,7·10<sup>-6</sup> м. Исходя из этого, легко вычислить длину любой

микроструктуры, рассчитанной ранее в условных единицах. Нужно всего лишь умножить значения длин на рассчитанную величину. Данная функция была также заложена в рассматриваемый модуль. Пользователю предоставляется возможность измерить определенную единицу масштабной линейки шлифа, а затем в диалоговом окне указать, какая по величине единица измерялась. Дальнейшие действия по переводу условных единиц в реальные производятся в автоматическом режиме. В результате этого в атрибутивной таблице геометрических параметров микроструктур появляется дополнительный столбец с реальными значениями.

#### **4. Опыт использования разработанного программного модуля в сочетании с ГИС-технологиями для решения задач специальной методики микроструктурного анализа**

Функционал разработанного программного модуля интегрированного в ГИС широко применялся авторами для автоматизации специальной методики микроструктурного анализа в сочетании с различными методами на урановом месторождении Антей. Оно расположено в юго-восточном Забайкалье в пределах Стрельцовской кальдеры, сформированной в процессе позднемезозойской тектономагматической активизации региона [1]. Жильно-штоковерковые рудные тела локализованы в гранитном фундаменте кальдеры и являются наиболее глубоко залегающими объектами добычи в Стрельцовском рудном поле. Вмещающие породы представлены в основном биотитовыми и лейкократовыми гранитами, а также высоко- и низкотемпературными метасоматитами в рудоносных зонах, контролируемых системой копланарных разломов.

Изначально исследования пород месторождения Антей с помощью микроструктурного анализа, автоматизированного представленным ГИС-модулем, сосредоточились на изучении геометрических параметров микроструктур определенного генетического типа – планарных систем флюидных включений (ПСФВ) [9], которые представляют собой микротрещины, захватившие вторичные флюидные включения и формирующие отчетливо проявленные системы. Наш интерес к ПСФВ был вызван тем, что ориентировка данных систем определяется вариациями параметров поля напряжений-деформаций, а состав включений – физико-химическими условиями миграции гидротермальных растворов [4]. По двумерным цифровым изображениям шлифов строились розы-диаграммы ориентировки микроструктур, с помощью которых были выявлены ПСФВ разных направлений. В результате проведенной

работы было установлено, что ПСФВ на месторождении Антей связаны с двумя основными наиболее проявленными генерациями микротрещин СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ ориентировки, являющихся отражением различных этапов тектогенеза и поступления флюидов в трещинно-поровое пространство. При этом было отмечено, что система СЗ-ЮВ простирается образно в первую очередь, а затем на нее наложилась система СВ-ЮЗ простирается.

На основе сочетания специальной методики микроструктурного анализа и радиографического анализа (осколковой радиографии) авторами была проведена реконструкция внутрирудной тектоники [5]. С помощью такого подхода было выявлено пространственное распределение урановых концентраций, которые, как оказалось, приурочены преимущественно к микротрещинам СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ простирается, как и ПСФВ. Кроме того, установлено, что урановорудный процесс на месторождении Антей протекал на фоне минимум двух стадий внутрирудных тектонических смещений, о чем свидетельствует приуроченность рудных скоплений к различным по возрасту и генезису системам микротрещин.

С помощью микротермометрических измерений совместно с В.Ю. Прокофьевым (ИГЕМ РАН) были изучены флюидные включения, «захваченные» каждой выявленной ранее генерацией ПСФВ. Таким образом, была реконструирована хронология событий, обусловленных изменением физико-химических условий в контексте перестройки поля напряжений и смены деформационных режимов. С использованием микротермометрических данных по пузырькам флюидных включений построена диаграмма, отражающая температуру гомогенизации и соленость, а также структурный параметр – ориентировку микротрещины, к которой данное флюидное включение относится. На основе группировки микротрещин определенной ориентировки, а также микротрещин, образовавшихся в близких температурных условиях, были выявлены четыре кластера, отражающие различные фазы поступления гидротермальных растворов в зону рудоотложения [6]. В результате данной работы на основе сочетания специальной методики микроструктурного анализа и микротермометрических исследований вторичных флюидных включений впервые стало возможно определять вариации термобарических и физико-химических условий рудообразования на конкретных этапах деформации геологических тел.

Помимо микротрещин, выполненных вторичными флюидными включениями, на основе сочетания специальной методики микроструктурного анализа и метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) совместно с О.А. Дойниковой (ИГЕМ

РАН) проводилось изучение минерализованных и частично минерализованных микротрещин, содержащихся в породах месторождения Антей. Было установлено, что различные генерации микротрещин также значительно отличаются и по минеральному выполнению [10]. Две близкие по условиям образования системы микротрещин были выполнены преимущественно урановой минерализацией, когда другая группа микроструктур, которые образовались в последнюю очередь, вероятно на фоне гидроразрыва, концентрировала минеральную фазу с редкоземельными элементами (преимущественно Ce, La, Sm, Gd, Nd).

Кроме того, на основе специальной методики микроструктурного анализа и с помощью созданного авторами программного модуля количественно рассчитывались фильтрационные характеристики (пористость и проницаемость) горных пород месторождения Антей в палео- и современных условиях [8]. Значения, полученные для открытой пористости и общей проницаемости пород, сопоставлялись с результатами лабораторных петрофизических исследований этих же образцов, проведенных в МГУ (Бурмистров А.А., Минаев В.А.). Значения, полученные расчетным путем с использованием микроструктурного подхода, и результаты лабораторных измерений показали хорошую сопоставимость.

### 5. Выводы

Разработанный авторами программный модуль, интегрированный в ГИС, значительно снижает трудоемкость реализации специальной методики микроструктурного анализа и сокращает время обработки и расчета геометрических параметров микроструктур, предоставляет необходимые возможности для полного анализа микротрещиноватости. Идея авторов проводить картирование структур на микроуровне с применением ГИС-технологий полностью себя оправдала. Разработанный ГИС-модуль отлично справляется со всеми поставленными задачами – позволяет «привязывать» фотографии отдельных секций шлифа в единой системе относительных координат, на основе векторизованных стандартными средствами ГИС микроструктур автоматически проводит измерение геометрических параметров (азимут простираения, длина, апертура). Кроме того, модуль автоматически определяет строки атрибутивной таблицы параметров микрообъектов и сравнивает значения азимутов, отмечая близкие по величине, позволяя выявлять микротрещины одной генерации и маркировать их определенным цветом, что важно для восстановления эволюции трещинно-порового пространства и установления этапов деформации пород. Кроме того, применение ГИС-технологий

дает возможность маркировки объектов и группировки их в отдельные векторные темы по возрасту и генезису, по типам (микротрещины, выполненные вторичными флюидными включениями, открытые или частично минерализованные микротрещины, а также микротрещины, выполненные рудным веществом). В программный код разработанного модуля были заложены формулы расчета фильтрационных характеристик, которые могут быть вычислены для всех систем микротрещин или для одной конкретной на разных этапах деформации геологических тел. Добавлена возможность построения наглядных роз-диаграмм трещиноватости, крайне необходимых при изучении тектоники. Благодаря подобным разработкам авторы смогли провести многочисленные исследования на урановорудном месторождении Антей, включавшие большой комплекс приемов и методов, в основе которых неизменно лежала специальная методика микроструктурного анализа и программный модуль, интегрированный в ГИС, который помог данную методику реализовать. Все это позволило получить важные и уникальные результаты. В дальнейшем программный код разработанного модуля может быть дополнен для расширения функций, которые будут необходимы для решения новых задач, возникающих в процессе исследований.

Работа выполнена в рамках госзадания ИГЕМ РАН по теме «Развитие интегрированной системы для пространственно-временного моделирования рудных объектов и рудообразующих процессов на основе ГИС-технологий». На основе материалов готовится заявка на изобретение.

**Ключевые слова:** микроструктурный анализ, специальная методика, ГИС-технологии, программный модуль, картирование микроструктур.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ищукова Л.П., Игошин Ю.А., Авдеев Б.В. Геология Урулунгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. – М. : ЗАО «Геоинформмарк», 1998. – 526 с.
2. Лукин Л.И., Чернышев В.Ф., Кушнарев И.П. Микроструктурный анализ. – М. : Наука, 1965. – 124 с.
3. Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. – М. : Недра, 1992. – 295 с.
4. Петров В.А. Тектонофизические и структурно-петрофизические индикаторы процессов миграции флюидов в разломных зонах и методы их изучения // Современная тектонофизика. Методы и результаты : в 2 т. – Т. 2. – М. : ИФЗ РАН, 2011. – С. 94-108.
5. Петров В.А., Устинов С.А., Полуэктов В.В. Реконструкция внутрирудной тектоники на урановом месторождении Антей: сочетание микроструктурного и радиографического анализов // Физико-химические и

- петрофизические исследования в науках о Земле : материалы двенадцатой международной конференции. – М. : ГЕОХИ, ИГЕМ, ИФЗ РАН, 2011. – С. 249-252.
6. Петров В.А., Устинов С.А., Полуэктов В.В., Прокофьев В.Ю. Реконструкция путей и условий миграции рудоносных гидротермальных растворов: структурно-геологический и термобарогеохимический подход // Вестник РФФИ. – 2013. – № 1 (77). – С. 27-33.
7. Устинов С.А., Петров В.А. Метод картирования и определения фильтрационных параметров систем микротрещин в горных породах на основе применения ГИС-технологий // Новые идеи в науках о Земле». Доклады : сб. тезисов X Международной конференции : в 3 т. – Т. 2. – РГГРУ. – М. : Экстра-Принт, 2011. – С. 86.
8. Устинов С.А., Петров В.А., Полуэктов В.В. Вариации фильтрационных характеристик пород месторождения Антей в зоне разлома 13 (микроструктурный подход) // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле : материалы четырнадцатой международной конференции. – М. : ГЕОХИ, ИГЕМ, ИФЗ РАН, 2013. – С. 261-264.
9. Устинов С.А., Петров В.А., Полуэктов В.В. Использование планарных систем флюидных включений в структурно-геологических исследованиях гидротермальных месторождений (на примере месторождения Антей) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2014. – № 1. – С. 36-41.
10. Устинов С.А., Петров В.А., Полуэктов В.В. Пространственно-временные взаимоотношения урановой и редкоземельной минерализации на месторождении Антей (микроструктурный подход) // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле : материалы пятнадцатой международной конференции. – М. : ГЕОХИ, ИГЕМ, ИФЗ РАН, 2014. – С. 223-226.
11. Dehoff R., Rhines F.N. Microscopic Quantitative. – Paris : Masson et Cie, 1972. – 401 p.
12. Gueguen Y., Dienes J. Transport properties of rocks from statistics and percolation // Mathematical Geology. – 1989. – 21. – P. 1-13.
13. Lespinasse M., Désindes L., Fratzak P., Petrov V. Microfissural mapping of natural cracks in rocks: Implications for fluid transfers quantification in the crust // J. Chemical Geology. – 2005. – N 223. – P. 170-178.
14. Sausse J., Jacquot E., Fritz B., Leroy J., Lespinasse M. Evolution of crack permeability during fluid-rock interaction. Example of the Brézouard granite (Vosges, France) // Tectonophysics. – 2001. – N 336 (1-4). – P. 199-214.
15. Xu J., Zhao X., Liu B. Digital image analysis of fluid inclusions // J. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2007. – T. 44. – № 6. – P. 942-947.