

УДК 553.086:551.2.08

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
СПЕЦИАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА****Устинов С.А., Петров В.А.***ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии»
Российской академии наук, Москва, e-mail: stevesa@mail.ru*

Специальная методика микроструктурного анализа подразумевает решение задачи измерения и анализа геометрических параметров микроструктур в ориентированных образцах горных пород в контексте изменения тектонической обстановки их формирования. При этом появляется возможность реконструкции путей миграции флюидов на фоне смены деформационных эпизодов, характеризующихся уникальными параметрами поля напряжений-деформаций. Особое внимание уделяется изучению планарных систем флюидных включений, выступающих в роли структурных индикаторов процессов миграции рудоносных растворов в неоднородном поле напряжений-деформаций. Методика опробована на ряде рудных объектов, но пока не получила широкого распространения. В связи с этим возникает необходимость обобщения теоретических основ и широкого освещения возможностей применения данного анализа. Для реализации специальной методики микроструктурного анализа авторами предложен уникальный подход на основе разработки программного модуля, интегрированного с ГИС. Программное обеспечение содержит все необходимые инструменты для автоматического замера геометрических параметров, выявления и анализа систем трещин по фотографиям ориентированных шлифов, полученным с помощью микроскопа, оборудованного цифровой фотокамерой. Показано, что результаты пространственного анализа различных генераций и типов микроструктур с помощью специальной методики микроструктурного анализа в совокупности с другими структурными данными и результатами анализа минерального вещества позволяют реконструировать условия миграции потоков гидротермальных растворов в рамках выявленных структурных эпизодов. В статье также приведены формулы количественного расчета значений микротрещинной пористости и проницаемости для определённого эпизода развития гидротермальной системы. Значения фильтрационных характеристик могут быть рассчитаны как для определённой генерации микроструктур, так и для совокупности систем, выполнявшей роль флюидопроводящих каналов на определённом этапе деформаций.

Ключевые слова: специальная методика микроструктурного анализа, микротрещины, планарные системы флюидных включений, поле напряжений-деформаций, физико-химические условия рудообразования, пористость, проницаемость

**THEORETICAL BASICS AND OPPORTUNITIES OF THE SPECIAL TECHNIQUE
OF MICROSTRUCTURAL ANALYSIS APPLICATION****Ustinov S.A., Petrov V.A.***Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy
of Sciences, Moscow, e-mail: stevesa@mail.ru*

The special technique of microstructural analysis involves solving the problem of measuring and analyzing the geometric parameters of microstructures in oriented rock samples in the context of changing the tectonic situation of their formation. In this case, it becomes possible to reconstruct fluid migration pathways against the background of deformation episodes changing characterized by unique stress-strain field parameters. Particular emphasis is paid to the study of fluid inclusion planes acting as structural indicators of ore-bearing solutions migration processes within inhomogeneous stress-strain field. The technique has been tested at a number of ore objects, but was not widely adopted. In this regard it becomes necessary to generalize the theoretical basics and broaden the sanctification of the analysis application opportunities. For realization of the special technique of microstructural analysis a unique approach based on the development of modular software integrated with GIS was proposed by authors. The software contains all necessary tools for automatic measurement of geometrical parameters, identification and analysis of crack systems using photographs of oriented thin sections, received by means of the microscope equipped with a digital camera. It is shown that results of the spatial analysis of various generations and types of microstructures, using the special technique of microstructural analysis in combination with other structural data and mineral analysis results allows reconstructing the hydrothermal solutions migration conditions within the identified structural episodes framework. The article also gives formulas for the quantitative calculation of the microcrack porosity and permeability values for a certain episode of the hydrothermal system development. Filtration values can be calculated both for a specific generation of microstructures and for systems set, which acted as fluid-conducting channels at a certain stage of deformations.

Keywords: special technique of microstructural analysis, microcracks, fluid inclusion planes, stress-strain field, physical and chemical conditions of ore formation, porosity, permeability

В отечественной геологической науке для решения некоторых задач структурной геологии, реконструкции напряжений и деформаций горных пород, изучения структур рудных полей и месторождений была разра-

ботана и применялась методика микроструктурного анализа. Данный анализ впервые возник в 1930 г., после того как Б. Зандер сформулировал его основные положения. Позднее микроструктурные исследования

проводились многими, преимущественно советскими, учёными и исследователями. Однако в настоящее время развитие и повсеместное использование при геологических и структурно-геологических исследованиях рассматриваемого анализа, из-за крайней сложности его проведения с технической точки зрения, необходимости сбора и обработки большого объёма информации, а также отсутствия иных независимых методов верификации полученных результатов, практически прекратилось.

В рамках современного этапа развития геологической науки для решения структурных задач всё чаще делается акцент на изучении трещин и микротрещин в ориентированных образцах горных пород, измерении их геометрических параметров и анализе минерального выполнения. Полученные результаты позволяют делать выводы о последовательности образования структур, выявлять этапы тектонических движений, восстанавливать пути миграции флюидов в трещинном пространстве горной породы, реконструировать параметры поля напряжений-деформаций (ПНД), связанные с конкретным тектоническим этапом. На основе накопленного опыта комплексного изучения микроструктур в образцах горных пород авторами создана специальная методика микроструктурного анализа (СММА) и сформулированы теоретические основы её применения.

Цель исследования: разработка и обобщение теоретических основ созданной авторами СММА, а также демонстрация возможностей и результатов её применения на основе использования дополнительных прецизионных методов анализа минерального вещества.

Материалы и методы исследования

Среди микроструктур в горных породах обычно выделяют открытые микротрещины, которые не заполнены минеральным веществом, а также минерализованные микротрещины, которые выполнены либо вторичными минералами, либо вторичными флюидными включениями. Захват вторичных флюидных включений происходит под действием какого-либо позднего (например, гидротермального) процесса после того, как кристаллизация вмещающего их минерала была уже завершена, при наличии в нём доступного проникаемого трещинно-порового пространства [1].

Минерализованные и частично минерализованные трещины являются важными индикаторами протекания процессов миграции флюидов в прошлые геологические

эпохи. Вторичные флюидные включения обычно «захватываются» микротрещинами, которые сформировались на фоне ориентированного стресса и потому представляют собой ориентированные закономерным образом генерации. Данные микротрещины при проведении структурных исследований получили название «планарные системы флюидных включений» (ПСФВ) [2].

Пространственная ориентировка каждой генерации ПСФВ также напрямую зависит от параметров действовавшего на момент её формирования ПНД. Поэтому исследования подобных планарных систем в качестве структурных маркеров в сочетании с детальным комплексным изучением других типов систем микроструктур можно использовать для восстановления этапов деформаций и проницаемости пород, реконструкции геометрии путей миграции флюидов, установления динамики изменения термобарических и физико-химических условий, связанных с определёнными этапами деформации геологических тел.

ПСФВ на начальных этапах деформаций формируются как микротрещины отрыва. Плоскость трещины чаще всего ориентирована перпендикулярно оси наименьшего сжатия σ_3 . При этом вектор максимальной проницаемости лежит в плоскости промежуточной оси σ_2 и оси максимального сжатия σ_1 , где обеспечивается наиболее интенсивная миграция флюидов (рис. 1).

Через некоторый промежуток времени смена тектонической обстановки приводит к компрессии, под действием которой активные микроструктуры запечатываются, «захватывая» первые флюидные (газово-жидкие) включения. Следующая тектоническая обстановка сопровождается новым этапом деформаций, следы которого фиксируются в ориентировке ПСФВ второй генерации, а состав и свойства выполняющих их включений характеризуют термобарические, физические и химические условия. Данный процесс повторяется с образованием новых генераций ПСФВ, до окончательного затухания гидротермальной активности.

Как показали в своих работах Смит и Эванс (1984), ПСФВ могут быть обнаружены во многих породообразующих минералах горных пород, вне зависимости от их кристаллографических свойств. При этом лучшую сохранность обеспечивают зерна кварца. Опыты продемонстрировали, что кристаллы полевых шпатов и карбонатов менее устойчивы к гидротермально-метасоматическим преобразованиям, процессам

выщелачивания и выветривания, соответственно, сохранность ПСФВ и возможности их изучения в данных минералах малы.

Именно на установление ориентировок генераций ПСФВ в сочетании с методами термобарогеохимии были направлены усилия зарубежных ученых при изучении рудных объектов. При этом другие важные типы микротрещин оставались без внимания. Необходимо отметить, что изучение открытых микроструктур и микротрещин, в которых происходило отложение минерального вещества, не всегда позволяет реконструировать параметры ПНД. Но измерение пространственно-геометрических параметров данных типов микротрещин и изучение характера их минерального выполнения играет решающую роль при конечном расчёте фильтрационных параметров горных пород, так как они, в отличие от ПСФВ, характеризуются большей протяжённостью и апертурой (шириной раскрытия), способствуя увеличению фильтрационной способности горных пород (рис. 1). Кроме того, параметры данных микроструктур необходимо учитывать при реконструкции геометрии трещинно-порового пространства, восстановления направлений и условий движения палеопотоков флюидов. Поэтому авторский подход к реализации СММА подразумевает, помимо установления ориентировок ПСФВ, решение задачи по реконструкции пространственных параметров и характера минерального выполнения минерализованных и открытых микроструктур.

Важным условием для реализации СММА, как и для классической методики,

является отбор ориентированных образцов. Далее из образцов обычно изготавливаются ориентированные шлифы. Пространственные параметры различных генераций микроструктур и характер их взаимоотношений могут быть изучены под оптическим микроскопом при помощи столика Федорова. Но при таком подходе измерение геометрических характеристик микроструктур, количество которых может достигать нескольких тысяч в одном ориентированном шлифе, занимает значительное время. Всё это определяет необходимость создания специализированного инструмента, который мог бы ускорить сбор, обработку и анализ пространственных микроструктурных данных. Так авторами был разработан ГИС-модуль для реализации СММА, изучения структурных неоднородностей горных пород, установления геометрии трещинно-порового пространства, различных типов и систем микроструктур, их пространственных взаимоотношений, реконструкции последовательности активизации и расчета фильтрационных характеристик [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Реконструкция ориентировки осей поля напряжений-деформаций. Благодаря применению СММА, реализованной с помощью авторского программного обеспечения, устанавливаются геометрические параметры микроструктур и их генераций, характеризующих параметры трещинно-порового пространства определённого этапа деформаций.

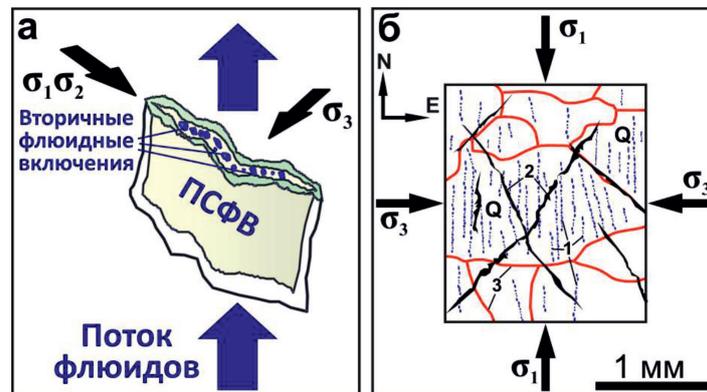


Рис. 1. Ориентировка осей поля напряжений-деформаций в зависимости от ориентировки ПСФВ; а – в трехмерном пространстве; б – в плоскости ориентированного шлифа: 1 – ПСФВ, 2 – открытые или минерализованные микротрещины, 3 – границы минеральных зёрен, Q – зерна кварца. σ_1 – ось максимального сжатия, σ_2 – ось наименьшего сжатия, $\sigma_1\sigma_2$ – плоскость промежуточной оси и оси максимального сжатия

Результаты выявления ориентировок ПСФВ, с учетом того, что они в большинстве случаев являются микротрещинами отрыва (или «гибридными») и их плоскости в большинстве случаев ориентированы преимущественно перпендикулярно оси наименьшего сжатия, могут быть восстановлены параметры ПНД на конкретном этапе эволюции гидротермальной системы.

В качестве примера можно привести работу авторов по изучению ориентировок ПСФВ с помощью СММА на урановом месторождении Антей (юго-восточное Забайкалье). На 9 и 11 горизонтах месторождения были выявлены две наиболее отчетливо проявленные генерации ПСФВ, имеющие северо-восток-юго-западные и северо-запад-юго-восточные простирания. На основе полученных результатов были построены сводные розы-диаграммы ориентировок ПСФВ (рис. 2) с учетом суммарной длины каждой генерации. Ориентировки сопоставлялись с результатами реконструкции динамики изменения ПНД, выполненной ранее на основе тектонофизических методов изучения макроструктур [4]. Оказалось, что ориентировка выявленных генераций ПСФВ совпадает с восстановленным простиранием осей максимального сжатия σ_1 , характеризующих второй и третий этапы тектогенеза, имевших место в процессе формирования месторождения. Полученные результаты подтвердили возможность использования ПСФВ в качестве структурных маркеров для реконструкции параметров ПНД, действовавших в палеоусловиях.

Восстановление физико-химических параметров гидротермального процесса для определённых стадий деформаций горных пород. Важной особенностью представляемой методики является то, что она позволяет устанавливать связь тектонодинамических процессов (формирование микроструктур) и физико-химических параметров.

Мелкая трещиноватость, рассматриваемая как совокупность небольших по размеру трещин, является не только отражением развития деформаций горных пород, но и формирует необходимые условия для успешного протекания процессов минералообразования.

Для решения задачи установления взаимосвязи структурных и физико-химических параметров недостаточно измерений геометрических параметров, помимо этого требуется использование прецизионных методов анализа минерального вещества, дающих информацию о температурах, давлениях, составе, солёности флюида и т.д. Результаты должны быть сопоставимы со структурными данными, полученными с помощью СММА. Решая данную задачу, авторы смогли сопоставить микроструктурные и тектонофизические данные с результатами определения свойств палеофлюидов (вторичных флюидных включений в микроструктурах) с помощью микротермометрии и состава минерального выполнения микротрещин с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). В дальнейшем результаты могут быть значительно дополнены благодаря применению рамановской спектроскопии [5] вторичных флюидных включений.

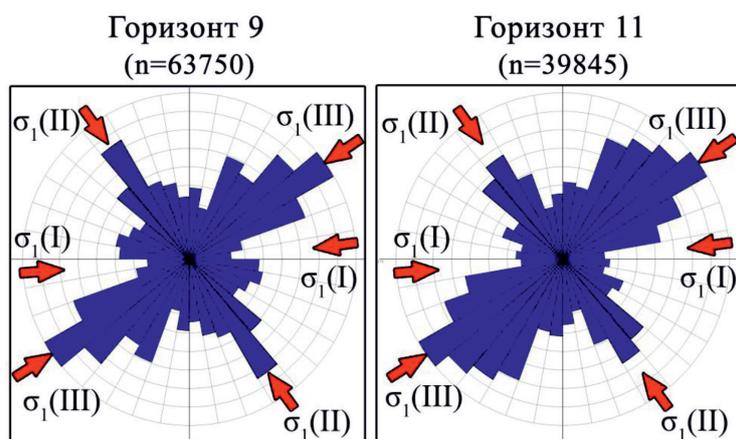


Рис. 2. Ориентировка ПСФВ на сводных розах-диаграммах для горизонтов месторождения Антей. n – количество замеров геометрических параметров микроструктур. Красные стрелки – ориентировка оси максимального сжатия σ_1 на первом – $\sigma_1(I)$, втором – $\sigma_1(II)$ и третьем $\sigma_1(III)$ этапах тектогенеза, выявленных ранее [4] макроструктурными методами

Структурные эпизоды преобразования пород на 9 и 11 горизонтах месторождения Антей по данным СММА и микротермометрических исследований вторичных флюидных включений, формирующих ПСФВ

Параметр	Структурный эпизод I	Структурный эпизод II	Структурный эпизод III
Ориентировки ПСФВ	Субширотные	Северо-западные (I генерация), северо-восточные	Субширотные, северо-западные (II генерация), субмеридиональные
Температуры гомогенизации флюидных включений, °С	380–300	300–220	220–150
Тип деформаций	Упруго-пластичные	Хрупкие	
Гидротермально-метасоматические преобразования	Калишпатиты, альбититы	Грейзенизация	Аргиллизация, хлоритизация, гематитизация

На основе синтеза результатов выявления ориентировок ПСФВ с помощью СММА и микротермометрических исследований вторичных флюидных включений, приуроченных к микротрещинам, процесс формирования месторождения Антей был разделён на три структурных эпизода. Каждый эпизод характеризовался определённым набором активных микроструктур, способствовавших ускорению процесса миграции флюидов в рамках гидротермальной активности (таблица), а также уникальными физико-химическими параметрами.

Реконструкция внутрирудной тектоники и путей миграции рудоносных флюидов. На основе комплексного изучения ориентировок выполненных рудным веществом микроструктур с помощью СММА в сочетании с различными методами анализа минерального вещества (СЭМ, рентгеноспектральный микроанализ, атомно-абсорбционная спектроскопия, радиография и др.) появляется уникальная возможность реконструкции внутрирудной тектоники и путей миграции исключительно рудоносных флюидов.

Так, применение осколковой радиографии и СЭМ в комплексе с СММА позволило авторам для месторождения Антей воссоздать последовательность активизации микроструктур, выполненных урановорудным веществом и характеризующих внутрирудную тектонику. Рудные скопления локализовались преимущественно в двух системах микротрещин. По тектоническим индикаторам (смещение одной системы относительно другой) было установлено, что первой сформировалась северо-запад-юго-восточная генерация, а затем проявились деформации, приведшие к появлению генерации северо-восток-юго-западного простирания (рис. 3, А). С помощью СЭМ были выявлены

отличия в минеральном выполнении данных микроструктур, дополнительно характеризующиеся концентрациями Ti в северо-восточных системах микротрещин (рис. 3, Б). Отсюда следует вывод, что отложение руды месторождения Антей происходило в рамках двух стадий микротектонических смещений, отражающих общий неоднородный тектонический характер функционирования рудоносной гидротермальной системы.

Количественный расчет общих и директивных фильтрационных параметров кристаллических пород в палео- и современных условиях. Помимо прочего, на основе реконструкции пространственных параметров микроструктур с помощью СММА, могут быть количественно рассчитаны фильтрационные характеристики горных пород для каждого выявленного ранее эпизода деформаций. С использованием данного подхода появляется возможность количественно рассчитать значения пористости и проницаемости, формируемые каждой активной системой микроструктур (директивные свойства) и оценить её вклад в общие фильтрационные значения.

Для расчета пористости горных пород, формируемой микротрещинами, авторы предполагают, что микроструктуры, возникшие в рамках одного структурного эпизода, взаимосвязаны. С учётом выявленной геометрии сети микротрещин, количественные расчеты производятся по формуле

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

где Φ – пористость (эффективная), выраженная в %; L – суммарная длина определённой системы трещин; S – площадь поверхности (в данном случае – площадь ориентированного шлифа); e – апертура (средняя ширина раскрытия) системы трещин.

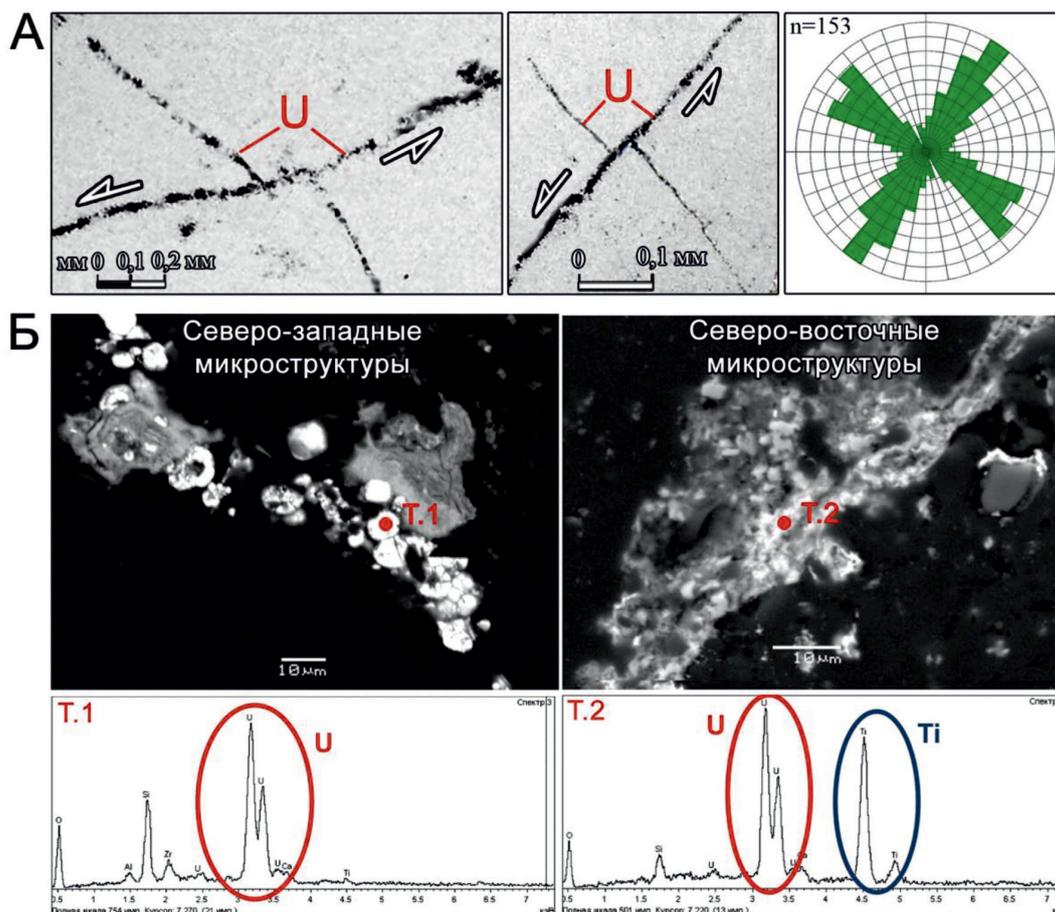


Рис. 3. Реконструкция процессов внутрирудной тектоники с применением осколковой радиографии (А) и изучение минерального выполнения рудоносных микроструктур с помощью СЭМ (Б) в сочетании с результатами СММА

Расчёты микротрещинной проницаемости осуществляются также исходя из предположения о взаимосвязи систем микротрещин одного эпизода деформаций. Помимо этого, для расчета структурной проницаемости необходимо знать угол падения микротрещин, значения которого пока не представляется возможным точно измерить в плоскости ориентированного шлифа. Поэтому авторами делается допущение о том, что микроструктуры имеют вертикальное падение. Такое допущение абсолютно справедливо и подтверждается сравнением расчётных и полученных в лабораторных условиях значений проницаемости горных пород. Учитывая вышесказанное, микротрещинная проницаемость (K_f), выраженная в m^2 или в дарси, может быть рассчитана по формуле

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

где ε – коэффициент неровности стенок трещин, N_f – объёмная плотность трещин системы, f , c – среднее значение половины длины трещин, e – апертура.

Объёмная плотность вычисляется по формуле

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

где θ – угол падения каждой трещины. Так как трещины перпендикулярны плоскости шлифа – $\sin \theta = 1$. Формула для K_f может быть упрощена:

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

При расчётах трещинной пористости и проницаемости, помимо предложенных формул, могут быть использованы различные подходы и формулы, выведенные на ос-

нове экспериментальных данных и результатов математического моделирования [6]. Алгоритмы наиболее известных подходов были заложены в разработанный авторами ГИС модуль реализации СММА.

Значения современной пористости и проницаемости, рассчитанные авторами по приведённым формулам для различных типов горных пород, показали хорошую сопоставимость с результатами лабораторных испытаний на основе петрофизических исследований [7]. Значения проницаемости, рассчитанные для выявленных структурных эпизодов, проявившихся на фоне давлений и температур, хорошо соотносятся с результатами лабораторных испытаний различных типов горных пород при воздействии на них эффективных давлений (до 200 МПа) и высоких температур (до 600 °С) [8].

Выводы

Реализация специальной методики микроструктурного анализа средствами ГИС технологий позволяет осуществлять картирование и маркировку различных типов микроструктур, а также оперативно измерять их пространственно-геометрические параметры непосредственно в ориентированных шлифах образцов горных пород. Комплексный подход к изучению трещинно-порового пространства на основе сочетания структурных и вещественных данных открывает возможности для реконструкции пространственно-временной связи между эпизодами деформаций и физико-химическими условиями протекания процесса эволюции рудоносной гидротермальной системы. Таким образом, при статистически значимом количестве образцов становится возможной реконструкция ориентировки осей ПНД, путей миграции рудоносных флюидов, расчета фильтрационных характеристик, формируемых определённой системой микроструктур или их совокупностью.

Разработанный подход применим для изучения многочисленных геологических объектов и месторождений, относящихся к различным промышленно-генетическим типам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00109.

Список литературы / References

1. Randive K.R., Hari K.R., Dora M.L., Malpe D.B., Bhondwe A.A. Study of Fluid Inclusions: Methods, Techniques and Applications. *Gond. Geol. Mag.* 2014. V. 29. P. 19–28.
2. Anders M.H., Laubach S.E., Scholz C.H. Microfractures: A review. *Journal of Structural Geology.* 2014. № 69. P. 377–394.
3. Устинов С.А., Петров В.А. Применение ГИС-технологий для микроструктурного анализа в геологии // *Геoinформатика.* 2015. № 2. С. 33–46.
4. Ustinov S.A., Petrov V.A. Using of GIS-technology for microstructural analysis in geology // *Geoinformatika.* 2015. № 2. P. 33–46 (in Russian).
5. Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Шучкин С.И., Хаммер Й. Природные и техногенные изменения напряженно-деформированного состояния пород на урановом месторождении в гранитах // *Физика Земли.* 2009. № 11. С. 86–93.
6. Petrov V.A., Poluektov V.V., Nasimov R.M., Shchukin S.I., Hammer J. Natural and technogenic changes in the mode of rock deformation in the uranium deposit in granites // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth.* 2009. T. 45. № 11. P. 1012–1018.
7. Колесов Б.А. Раман-спектроскопия в неорганической химии и минералогии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 189 с.
8. Kolesov B.A. Raman spectroscopy in inorganic chemistry and mineralogy. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Science publishing house, 2009. 189 p. (in Russian).
9. Мальковский В.И., Пэк А.А. Влияние разрывных нарушений на процессы флюидного теплопереноса в земной коре. М.: ИФЗ РАН, 2014. 120 с.
10. Malkovsky V.I., Pek A.A. Influence of explosive violations on processes of a fluid heatmass transfer in crust. М.: IFZ RAN, 2014. 120 p. (in Russian).
11. Минаев В.А. Структурно-петрофизические условия локализации урановых руд в фундаменте Стрельцовской кальдеры (на примере месторождения Антей): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.11. Москва, 2017. 25 с.
12. Minayev V.A. Structural and petrophysical conditions of localization of uranium ores in the base of the Streltsovsky caldera (on the example of the field Antaeus): avtorefer. dis. ... kand. geol.-min. nauk: 25.00.11. Moskva, 2017. 25 p. (in Russian).
13. Жариков А.В., Величкин В.И., Мальковский В.И., Шмонов В.М. Экспериментальные исследования фильтрационных свойств кристаллических пород в целях подземного захоронения радиоактивных отходов // *Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* 2013. № 2. С. 153–171.
14. Zharikov A.V., Velichkin V.I., Malkovsky V.I., Shmonov V.M. Experimental Study Of Crystalline Rock Filtration Properties: Implications For Underground Radioactive Waste Disposal // *Geoe'kologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya.* 2013. № 2. P. 153–171 (in Russian).