

УДК 553.495:550.4:551.2:550.428

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ В СЕТИ ФЛЮИДОПРОВОДЯЩИХ РАЗРЫВОВ

© 2019 г. В.А. Петров^{1,*}, М. Леспинас², В.В. Полуэктов¹, С.А. Устинов¹,
В.А. Минаев¹

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 35

²Лаборатория Георесурсов, Университет Лотарингии, Нанси, Франция

*E-mail: vlad243@igem.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 08.11.2018 г.

Принята к публикации 27.02.2019 г.

В приведенном в статье материале последовательно изложена методология изучения ориентировки и морфогенетических характеристик разрывных систем четырех масштабных уровней: километры, метры, сантиметры и миллиметры. В качестве объекта исследований выбран Уртуйский гранитный массив, расположенный в Юго-Восточном Забайкалье к западу от Стрельцовской кальдеры, вмещающей уникальные по запасам урановые месторождения. Массив сложен позднерифейскими гранитами и гранито-гнейсами, в различной степени затронутыми динамометаморфическими и гидротермально-метасоматическими преобразованиями, и рассечен многочисленными разрывными нарушениями со следами флюидной активности разных эпизодов тектогенеза. Установлена взаимосвязь между такими геометрическими параметрами разрывных систем, как удельная плотность и удельная длина. Показано, что эти геоструктурные данные целесообразно использовать для концептуального и числового моделирования процессов фильтрации флюидов и транспорта радионуклидов, происходящих в трехмерном трещинно-поровом пространстве кристаллических пород, в приложении к реконструкции и моделированию процессов уранового рудообразования и использованию геологического пространства для изоляции радиоактивных материалов.

Ключевые слова: разрывные системы, трещины, микротрещины, масштабный эффект, Уртуйский гранитный массив, планарные системы флюидных включений, пористость, проницаемость

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016-77706143-14>

ВВЕДЕНИЕ

Явление изменения каких-либо свойств природных или искусственных объектов и материалов при варьировании их размеров (масштаба) носит название масштабного эффекта. Этот эффект проявляется во всех гетерогенных (неоднородных по составу, свойствам и состоянию) объектах, определяя их упруго-прочностные, геомеханические, фильтрационно-емкостные, теплофизические, электромагнитные и другие параметры (Садовский, 1983; Деформирование..., 1987). Применительно к проблеме изучения месторождений полезных ископаемых роль масштабного эффекта, как правило, повышается по мере укрупнения масштаба изучаемого рудного объекта (рудное поле, месторождение, рудная зона, рудное тело и т. д.). Однако в практике геолого-геофизических исследований рудных объектов и мест размещения радиоактивных отходов масштабный эффект учитывается весьма приблизительно именно в связи с

неоднородностью строения, состава и свойств геопространства на различных его уровнях. Поэтому проблема оценки масштабного эффекта является весьма актуальной.

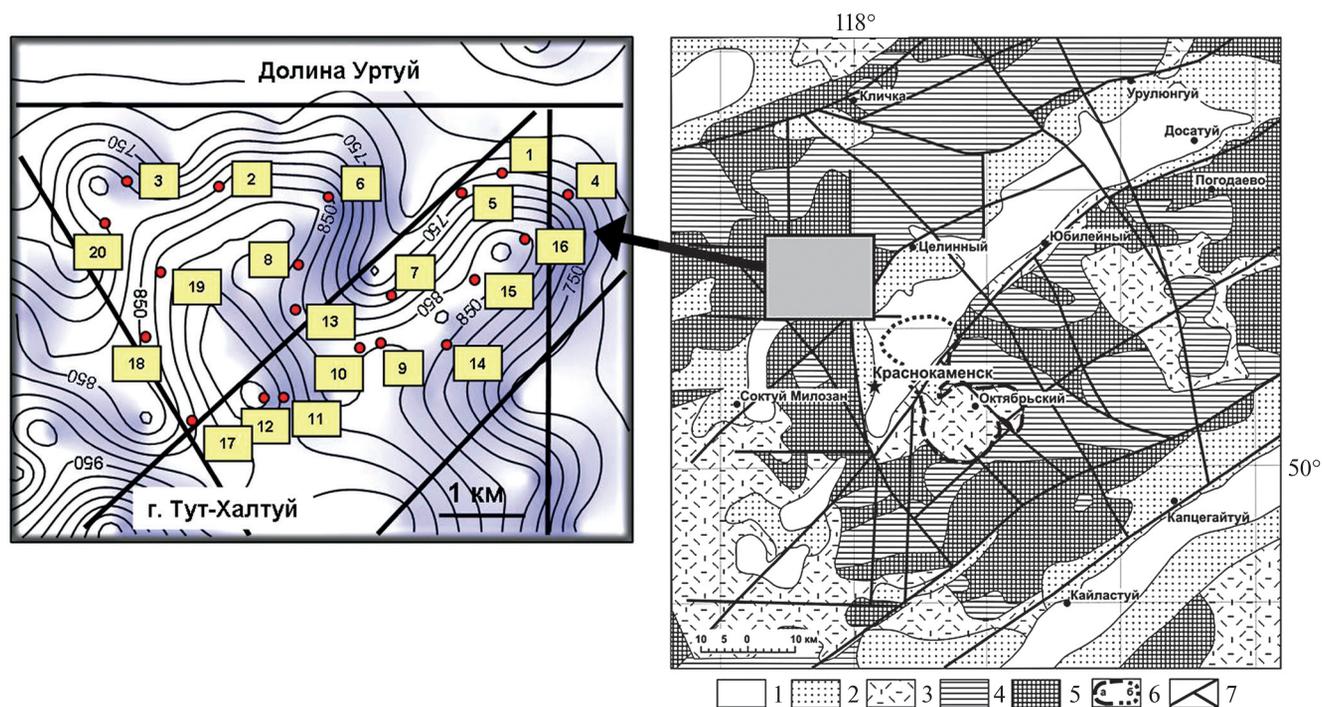
Ключевым вопросом, требующим ответа, для постановки и решения практических задач, является ремасштабирование (апскейлинг и даунскейлинг) эффективных геометрических параметров разрывных нарушений, определяющих фильтрационно-транспортную способность пород (Петров и др., 2017). Этот вопрос является предметом детального изучения и обсуждения в последнее десятилетие в связи с созданием трёхмерных численных гидродинамических моделей многофазной фильтрации, тектонофизических моделей, моделей геомеханики сложных геологических структур, моделей тепломассопереноса и т. д. (Dersowitz *et al.*, 1992; Almeida *et al.*, 1996; Bonnet *et al.*, 2001; Guéguen *et al.*, 2006; Mallet, 2014). Например, гидродинамические модели создаются на основе

геологических моделей, которые могут содержать такое количество ячеек в разностной сетке, что время расчётов становится неприемлемым. Возникает необходимость уменьшить количество ячеек в модели. Для этого мелкие ячейки геологической (структурной) сетки объединяются в крупные ячейки гидродинамической сетки. Эквивалентные фильтрационно-ёмкостные параметры этих крупных ячеек задаются таким образом, чтобы различие результатов расчётов на исходной и укрупненной сетках было минимальным. Аналогичная процедура применяется для реконструкции полей напряжений и деформаций, в том числе в связи с анализом процессов гидротермального рудообразования (Петров и др., 2015) и при определении фильтрационно-ёмкостных характеристик пород для изоляции радиоактивных материалов (Лаверов и др., 2004).

Моделирование фильтрационных свойств массивов пород в наиболее методически обоснованных подходах базируется на статистических данных по гидравлической проводимости трещин (Bour, Davy, 1997; Dewandel *et al.*, 2012), на материалах полевых исследований (количество трещин, длина, апертура, проницаемость) (Черны-

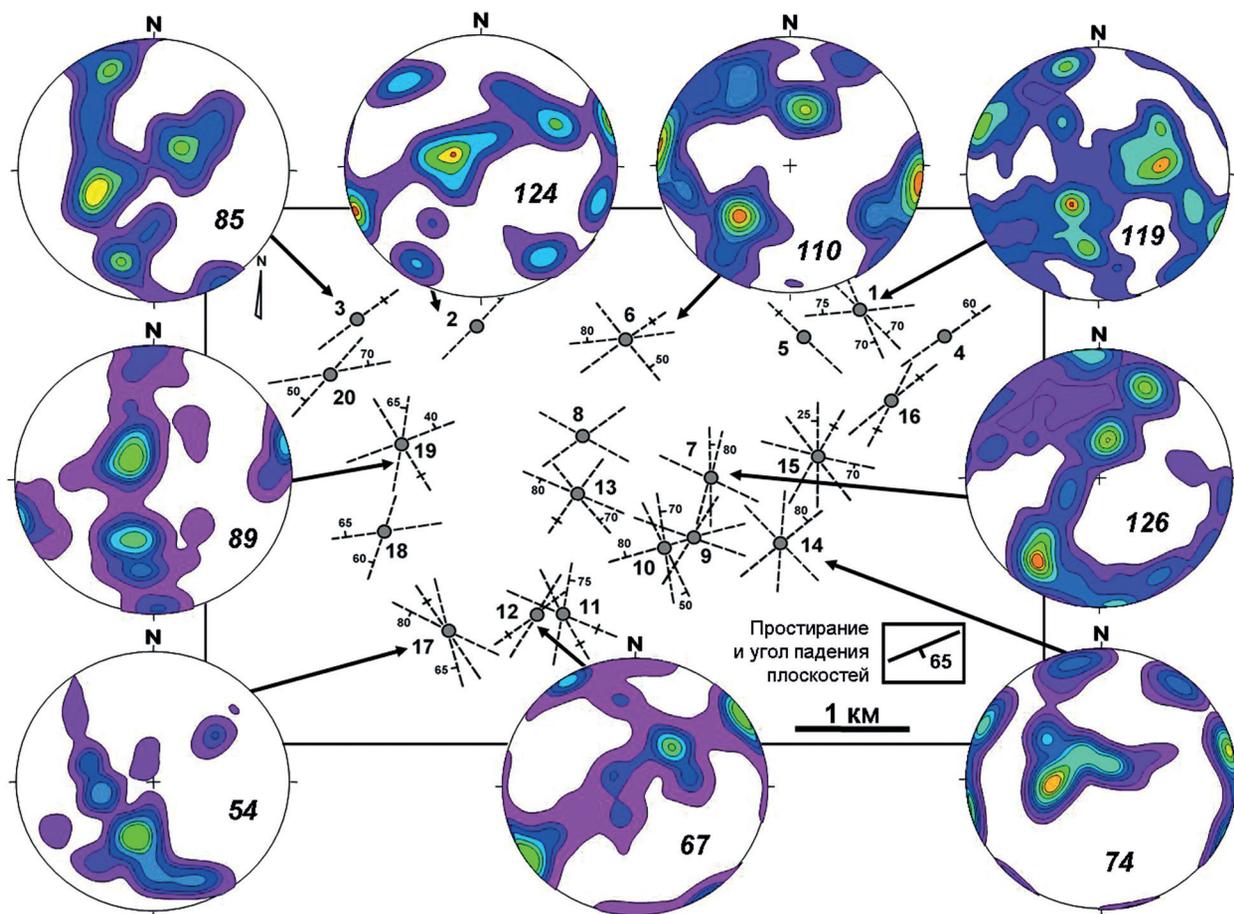
шев, 1979; Caine *et al.*, 1996; Castaing *et al.*, 1996; Odling, Roden, 1997) и на данных по эволюции разломно-трещинных систем, включая время их образования, морфогенетические особенности и кинематические характеристики (Dezayes *et al.*, 2010; Le Garzic *et al.*, 2011).

Основная методологическая проблема этих исследований – сложность, порой невозможность, сбора количественных данных о трещинных флюидопроводящих системах различного масштабного уровня в одном и том же месте. Поэтому задачи апскейлинга и даунскейлинга свойств пород решаются, как правило, с помощью различных математических приёмов и расчетных моделей (Guéguen, Diennes, 1989; Park *et al.*, 1997; Falconer, 1997; Paredes, Elorza, 1999; Ehlen 2000; Bour *et al.*, 2002; Empereur-Mot, Villemin, 2002; Guéguen *et al.*, 2006; Kruhl, 2013; Reeves *et al.*, 2013). Несмотря на востребованность этих данных, в геологической литературе практически отсутствуют материалы объединенных полевых и лабораторных исследований, связывающих километровый и микрометрический масштабы измерений в одном районе, на площади или в разрезе пород.



Фиг. 1. Справа – положение Стрельцовской рудовмещающей кальдеры в региональных геологических структурах Юго-Восточного Забайкалья.

1 – неоген-четвертичные осадки; 2 – раннемеловые осадочно-вулканогенные комплексы; 3 – дораннемеловые вулканогенно-осадочные комплексы; 4 – палеозойские интрузивные гранитные комплексы; 5 – архей-протерозойские и раннепалеозойские гранито-гнейсы и комплексы магматических пород; 6 – Стрельцовская кальдера, обрамленная установленными (а) и предполагаемыми (б) кальдерообразующими разломами; 7 – зоны региональных глубинных разломов. Серый прямоугольник показывает расположение УГМ в северо-западном обрамлении кальдеры. Слева – расположение участков (точки 1–20) изучения трещиноватости и отбора ориентированных в пространстве образцов пород. Показаны зоны основных разломов и изолинии высот в пределах УГМ.



Фиг. 2. Стереограммы распределения узлов пересечения плоскостей трещин (нижняя полусфера, программа StereoNet3.03) в породах УГМ. Цифрами указано количество изученных на базовой точке трещин.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УРТУЙСКОГО ГРАНИТНОГО МАССИВА

Объектом нашего изучения являлся Уртуйский гранитный массив (УГМ), расположенный в западном обрамлении Стрельцовской урановмещающей кальдеры в Юго-Восточном Забайкалье (фиг. 1). Породы массива представлены гранито-гнейсами, порфиробластовыми гранитоидами и амфиболизированными габброидами урулюнгуевского комплекса позднего рифея (804–784 млн лет), подвергнутыми полистадийным динамометаморфическим и гидротермально-метасоматическим преобразованиям (Petrov *et al.*, 2013; Полуэктов и др., 2017).

Полевыми структурно-геологическими и тектонофизическими в сочетании с лабораторными минералого-петрографическими исследованиями установлено пять основных элементов внутреннего строения УГМ:

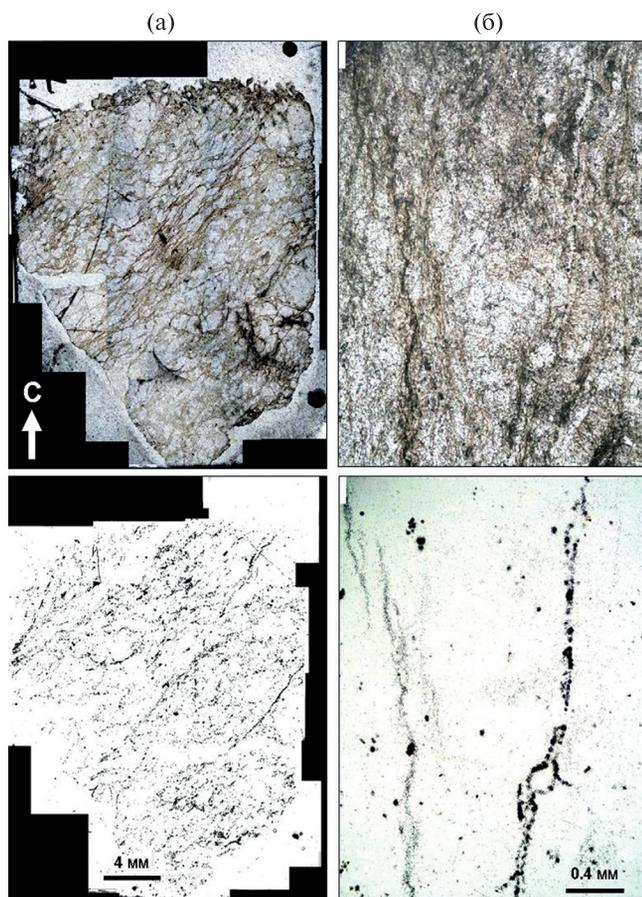
- первичная магматическая линейность;

- зоны пластических деформаций (“рассланцевания”) северо-восточного – юго-западного простирания;

- зоны “полухрупких” деформаций север-северо-восточного – субмеридионального простирания;
- разломы сбросового и сбросо-сдвигового характера северо-восточного – юго-западного, субмеридионального и северо-западного – юго-восточного простирания;

- системы крутопадающих северо-восточных – юго-западных, север-северо-восточных – юг-юго-западных, запад-северо-западных – восток-юго-восточных и субмеридиональных трещин, а также системы пологих трещин субмеридионального и северо-западного – юго-восточного простирания.

Наиболее ярко первичная магматическая линейность (“сланцеватость”) проявлена в пределах точек (Т) 1, 9, 10, 11 и 19. Обобщение данных по элементам залегания показало, что в широтном разрезе магматическая линейность замыкается в виде купола с крутопогружающимися крыльями и прогнутой седловидной центральной частью, а в меридиональном разрезе строение купола осложнено широтными складками, создающими гофрированную структуру. Анализ данных по пространственной ориентировке магматической



Фиг. 3. Характер распределения урана в ориентированных в пространстве (С – север) шлифах (вверху), установленный методом осколковой радиографии (внизу). а) в «бластомилонитовом» ядре зоны расланцевания северо-восточной – юго-западной ориентировки (Т 17) распределение ураносодержащих минералов связано с линейными дислокациями. Концентрации урана достигают 14 ppm; б) на удалении от зоны расланцевания (Т 19) накопление урана (до 15 ppm) связано, в основном, с оксигидроксидами Fe, Ti и Mn, выполняющими полости трещин. Содержание урана приведены по данным ICP-MS (CRPG, Нанси, Франция).

линейности позволил в целом определить контур массива, но для решения вопроса об уровне его эрозионного среза этих данных недостаточно. Для этого целесообразно провести специализированные исследования по восстановлению направлений вектора магнитной восприимчивости (метод AMS, Anisotropy of Magnetic Susceptibility) в ориентированных образцах пород.

Зона пластических деформаций (мощностью до 1.5 м) была обнаружена в Т 5, 7, 12, 13 и 17. Характерная черта внутреннего строения зоны – присутствие относительно слабонарушенных будин кварц-полевошпатового состава, заключенных в интенсивно развальцованном кварц-хлорит-карбонатном цементе. В ядре зоны выявлены

кварц-турмалиновые линзы (Бакшеев и др., 2012) с рассеянной урановой минерализацией с возрастом 783 ± 26 млн лет (Голубев, 2011), что свидетельствует о высокой степени флюидопроницаемости зоны в геологическом прошлом.

Зона «полухрупких» деформаций север-северо-восточного – субмеридионального простирания (общая мощность до 10 м) экспонирована в Т 1 (борт карьера «Камень-2»). Отличительная черта строения зоны – наличие нескольких милонитовых швов мощностью до 20 см, в которых заключены раздробленные будины кварц-полевошпатового состава, а также интенсивно проявлена трещиноватость пород в межшовных блоках.

Наиболее крупные разломы сбросового и сбросо-сдвигового характера северо-восточного – юго-западного, субмеридионального и северо-западного – юго-восточного простирания экспонированы в Т 1, 11, 18 и 19. Структурное отличие этих разломов от зон «полухрупких» деформаций – наличие одного магистрального шва (мощностью до 2 м) и трещиноватость, развитая в зоне его динамического влияния. В пределах шва породы интенсивно расланцованы, а на плоскостях отчетливо фиксируются борозды скольжения, по которым восстанавливается характер вертикальных и горизонтальных перемещений. Системы сопровождающих трещин нередко выполнены молочно-белым кварцем (мощность жил до 5 см) и кварц-карбонатным агрегатом.

Геометрический (генезис, морфология) и статистический (элементы залегания, апертура, линейная и объемная плотность, минеральное выполнение) анализы более 1500 трещин показали наличие линейных крутопадающих зон повышенной трещиноватости пород, которые рассекают площадь массива в пяти ранее отмеченных направлениях, а также системы пологих трещин (фиг. 2).

Характер распределения урановых концентраций в развальцованном кварц-хлорит-карбонатном цементе зоны пластических деформаций свидетельствует о сингенетичности процессов деформации и поступления ураноносных растворов (фиг. 3а). Распределение концентраций урана в трещинах (фиг. 3б) определяется их сорбцией оксидами и гидроксидами Fe, Ti и Mn.

Все перечисленные структурные элементы – индикаторы геологических (геотектонических) процессов, протекавших в пределах УГМ в разное время. Пространственное совмещение (суперпозиция) этих индикаторов позволяет выделить две основных зоны северо-восточного – юго-западного и северо-западного – юго-восточного простирания, в пределах которых породы обладают наибольшей флюидопроницаемостью.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

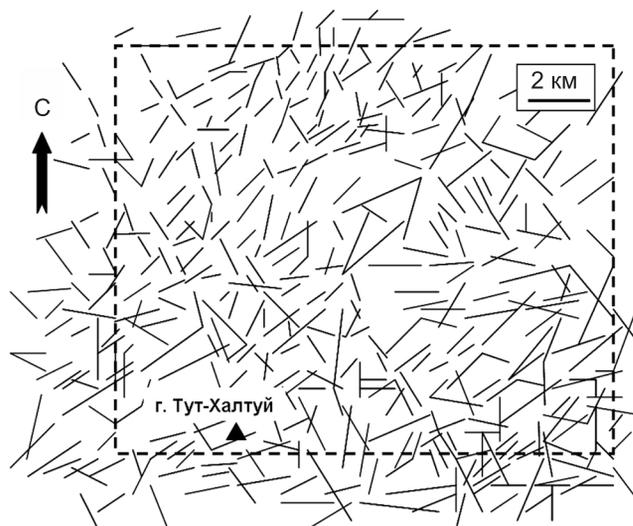
Основная цель работы – установить взаимосвязь между геометрическими параметрами (плотность и длина) разрывных нарушений четырех масштабных уровней (километры, метры, сантиметры и миллиметры) и оценить возможность дальнейшего использования этих геоструктурных данных для концептуального и числового моделирования процессов фильтрации флюидов и транспорта радионуклидов в трехмерном трещинно-поровом пространстве кристаллических пород.

Расчет значений геометрических параметров разрывных структур осуществлялся на основе материалов дешифрирования космоснимков и анализа полевых маршрутных данных, а также с использованием более специфических подходов, таких как пропитка образцов пород подкрашенной смолой для выявления трещин в сантиметровом масштабе и анализ структуры микротрещинного пространства.

Линеаменты соответствуют разлому или линейным трещинным системам в километровом масштабе. Они выявлялись при дешифрировании космоснимков (фиг. 4).

Изученная область Уртуйского массива составила 400 км² (20 × 20 км). Ориентировка в пространстве и длина линеаментов на космоснимках устанавливались с помощью компьютерных кодов свободно распространяемой программы ImageJ, что позволило получать показатели удельной площади (количество/мм²) и удельной длины (мм/мм²). Длина каждого линеамента рассматривалась в отношении к половине периметра FERET (Facial Recognition Technology Program) с учётом того, что линеаменты линейны и что их толщина может быть приравнена к одному пикселю.

Метрические неоднородности были исследованы в полевых условиях на 20 обнажениях корен-



Фиг. 4. Структурный каркас линеаментов УГМ, реконструированный по космическим снимкам территории. Прямоугольником показана площадь детального изучения макротрещиноватости.

ных пород, 14 из которых признаны кондиционными (фиг. 5).

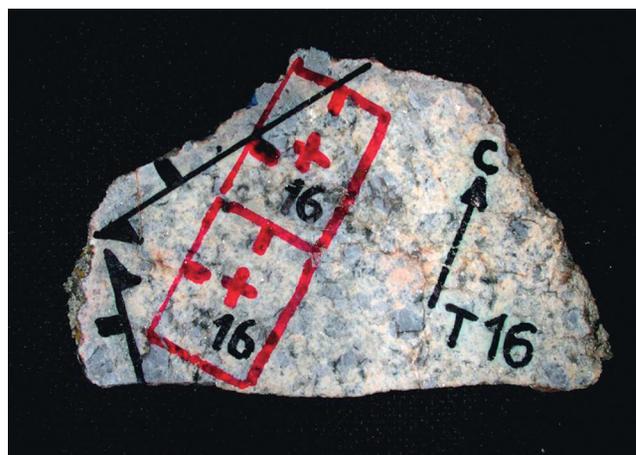
Площадь каждого такого обнажения составляла не менее 25 м². К неоднородностям относились трещины различной морфологии без видимых смещений стенок. Показатели плотности были получены на каждом обнажении путем подсчета общего количества для всех систем с одинаковым простиранием и румбом падения. Длина трещин на обнажениях не определялась.

Сантиметровые трещины изучались в 14 штучках, вырезанных из пространственно ориентированных образцов с каждого обнажения (фиг. 6).

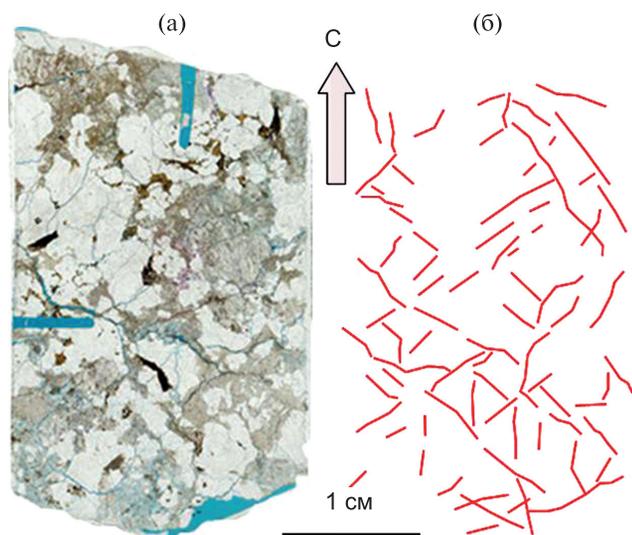
Эти трещины в основном прямолинейны, характеризуются различным минеральным выполнением, пересекают границы зерен и фиксируются



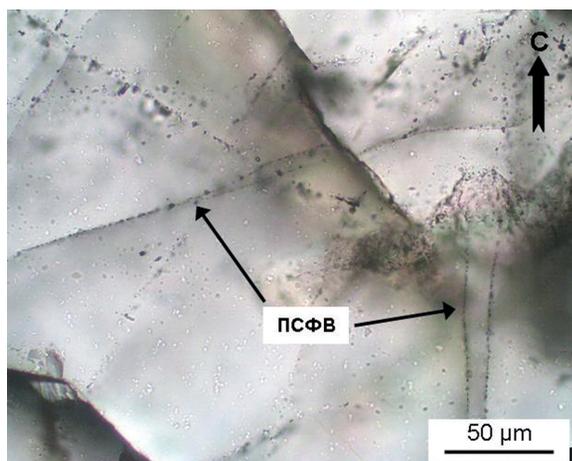
Фиг. 5. Пример площадки (Т 10) для изучения макротрещиноватости пород.



Фиг. 6. Пример ориентированного в пространстве (С – север) штуча (Т 16), на плоскости которого отмечены места для изготовления шлифов.



Фиг. 7. Пример последовательности проведения анализа каркаса сантиметровых трещин от насыщения ориентированного в пространстве образца (Т 16) флуоресцирующим гелем и изготовления прозрачно-полированного шлифа (а) до оцифровки изображения (б) и определения эффективной пористости ($F = 2.74\%$) трещинного пространства с помощью метода AnIma (Lespinasse *et al.*, 2005).



Фиг. 8. Трещины микрометрического масштаба, представленные в ориентированных шлифах планарными системами флюидных включений (ПСФВ) (образец из точки 17).

как устойчивые сети. Для их визуализации штудфы пропитывались подкрашенной синими чернилами смолой Araldite DBF01 (низкая вязкость при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) и затвердителем НУ956ЕН. Пропитка проводилась в специально сконструированной в Университете Лотарингии (Нанси, Франция) камере с контролем давления и температуры. Максимальное давление в камере составляло 200 бар. Время пропитки около 1 часа. Каждый ориентированный образец был разделён на секции по $5\text{--}6\text{ см}^3$. После полировки поверхностей образцы помещались в

камеру. Полимеризация смолы происходила при атмосферном давлении и температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. После охлаждения из секций изготавливались ориентированные шлифы. Каждая ориентированная секция сканировалась с высоким разрешением для получения изображения трещин в сантиметровом масштабе. Заполненные синей смолой трещины были хорошо различимы на плоскостях образцов (фиг. 7). Пространственные параметры трещин определялись с помощью кодов программы ImageJ. Затем по методике, представленной в (Lespinasse *et al.*, 2005), рассчитывалась эффективная трещинная пористость каждого образца.

Трещины микрометрического масштаба изучались в 13 ориентированных прозрачно-полированных шлифах (каждый площадью 3.75 см^2), изготовленных из ориентированных секций. К неоднородностям этого масштабного уровня отнесены микротрещины, захватившие вторичные флюидные включения с газовой, жидкой и твердой фазами. Они формируют отчетливо проявленные системы, свидетельствующие, что процесс прохождения флюидов через матрицу горной породы был достаточно длительным (Smith, Evans, 1984) и протекал на фоне ориентированного стресса (Boullier, 1999). Данные системы в практике структурно-геологических исследований получили название «планарные системы флюидных включений» (ПСФВ) (Lespinasse, 1999). ПСФВ очень хорошо визуальнo отличаются в шлифе от других типов микротрещин (фиг. 8).

Благодаря тому, что ориентировка ПСФВ определяется вариациями параметров поля напряжений и деформаций (Lespinasse, Pecher, 1986; Cathelin *et al.*, 1994; Barnhoorn *et al.*, 2010), возможно использовать их в качестве структурных маркеров для воссоздания хронологии палеопроницаемости пород, реконструкции геометрии путей миграции флюидов и установления динамики изменения термобарических и физико-химических условий на различных этапах тектогенеза геологических тел (Петров и др., 2013). Параметры ПСФВ были проанализированы с помощью компьютерных кодов AnIma (Lespinasse *et al.*, 2005) и верифицированы средствами специальной методики микроструктурного анализа (Устинов, Петров, 2015).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установленные геометрические параметры флюидопроводящих разрывных структур четырех масштабных уровней, развитых в пределах Уртуйского гранитного массива, приведены в таблице 1.

Сравнительный анализ ориентировок неоднородностей показывает, что северо-восточное – юго-западное и северо-западное – юго-восточное направления присутствуют на всех масштабных

Таблица 1. Параметры разномасштабных неоднородностей

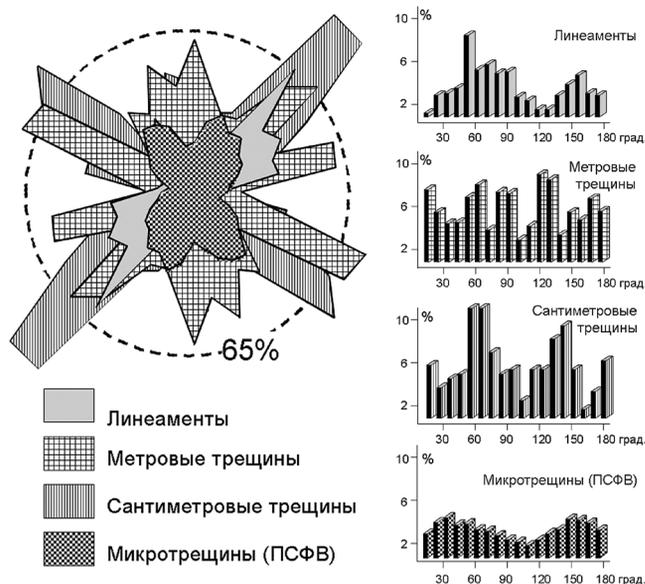
Масштаб разрывного нарушения	Кол-во (N)	Изученная площадь	Суммарная длина	Удельная плотность (N/мм ²)	Удельная длина (мм/мм ²)
Линеаменты	298	40 км ²	211.63 км	$7.45 \cdot 10^{-14}$	$5.28 \cdot 10^{-07}$
Метровые трещины	1148	350 м ²	не опред.	$3.28 \cdot 10^{-07}$	не опред.
Сантиметровые трещины	221	48.75 см ²	41.6 см	$4.53 \cdot 10^{-02}$	$8.53 \cdot 10^{-02}$
Микротрещины (ПСФВ)	2275	482 мм ²	590 мм	4.72	1.224

уровнях, а различия намечаются для субширотных и субмеридиональных направлений (фиг. 9).

Форма розы-диаграммы на фиг. 9 (слева) позволяет заключить, что интегральный результат формирования разномасштабных (6–7 порядков) разрывных нарушений, сформированных в различных тектонодинамических режимах в течение длительной геологической истории развития Уртуйского гранитного массива, запечатлевается с высоким уровнем подобия их ориентировки. Это, в свою очередь, свидетельствует в пользу тектонофизической модели развития «магистрального разлома» (в нашем случае линеамента), предусматривающей на начальных стадиях деформирования массива заложение сети микроразрывов, которые, постепенно сливаясь, формируют линейные эшелонированные трещинные зоны с последующим образованием главной плоскости сместителя (Семинский, 2003).

Сравнительные диаграммы на фиг. 9 (справа) интересно интерпретировать в приложении к рудным объектам. Если полученные данные дополнить, например, информацией о возрасте и характере минерального выполнения метровых трещин, то появляется возможность реконструировать связь тектонических и минералообразующих процессов, ответив на один из ключевых вопросов – в какой тектонической обстановке (на каком этапе тектогенеза) системы трещин какого направления были наиболее гидравлически активны и проницаемы для гидротермальных растворов.

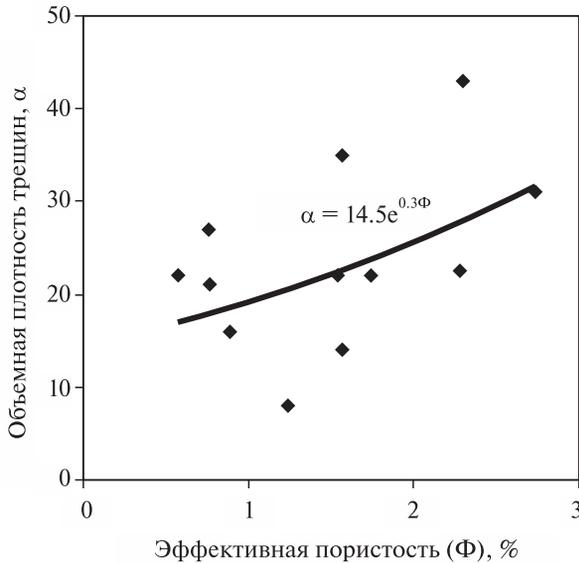
Наряду с этим пространственные взаимоотношения генераций ПСФВ, являющихся маркерами длительной и повышенной флюидопроницаемости пород, могут дать важную информацию о динамике формирования более крупных разрывов. Так, например, интенсивный бластез и рассланцевание пород указывают на то, что зона северо-восточного – юго-западного простирания формировалась на заключительных стадиях пластических деформаций остывающего магматического тела в условиях сдвигового поля напряжений. Если принять во внимание возраст вмещающих пород (804–784 млн лет) и возраст развитой здесь урановой минерализации (783 ± 26 млн лет), то возникновение зоны рассланцевания следует отнести к протерозойскому времени. Более того,



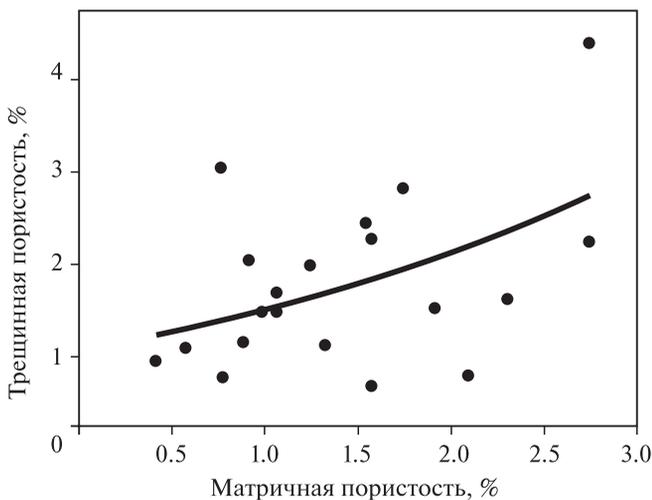
Фиг. 9. Пространственные характеристики флюидопроводящих неоднородностей всех масштабных уровней УГМ: слева – роза-диаграмма ориентировок разрывов (для 65 % выборки), справа – сравнительные диаграммы „количество разрывов (%) – ориентировка разрывов (град.)”.

предварительные микротермометрические измерения (Университет Лотарингии, Нанси, Франция) газо-жидких включений из ПСФВ в кварце зоны рассланцевания показали их повышенную соленость по сравнению с включениями в кварце из разломов других ориентировок, что может являться дополнительным свидетельством древнего и глубокого заложения этой зоны.

Эффективная пористость матрицы пород, установленная по цифровым изображениям шлифов (см. фиг. 7) и заверенная методом гидростатического взвешивания (Геологический факультет МГУ), изменяется от 0.41 до 2.74% при средних для всех образцов значениях 1.41%. Сравнение этих данных с результатами изучения трещиноватости на каждой площадке (базовой точке) показало, что эффективная пористость пород (Φ , %) и объемная плотность метровых трещин (α , п/м³, где п – количество трещин в естественном залегаении на глубину 1 м) связаны между собой экспоненциальной зависимостью $\alpha = 14.5e^{0.3\Phi}$ (фиг. 10).



Фиг. 10. Взаимосвязь между эффективной пористостью пород (%) и объемной плотностью (α) метровых трещин.



Фиг. 11. Взаимосвязь между матричной и трещинной пористостью для неоднородностей сантиметрового масштаба.

При этом объемная плотность систем метровых трещин варьирует от 8 в породах на удалении от центральных частей (ядер) разломов сбросового и сбросо-сдвигового характера до 43 в непосредственной близости от линейной зоны пластических деформаций.

Корреляционная связь между трещинной и матричной пористостью, которые были рассчитаны с помощью метода AnIma для трещин сантиметрового масштаба (Lespinasse *et al.*, 2005), иллюстрирует фиг. 11.

Этот график, сходный по форме с графиком на фиг. 10, свидетельствует о том, что матричная пористость, наряду с другими факторами, зависит

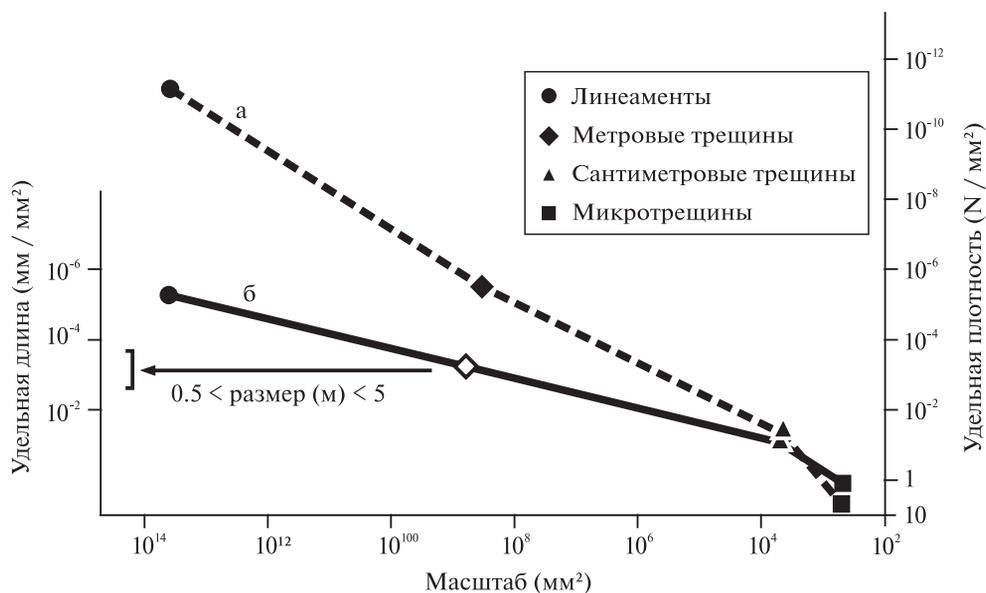
от интенсивности развития микроразрушений в зонах динамического влияния трещин, т. е., если говорить в целом, от интенсивности деформационных преобразований пород. Графики, представленные на фиг. 10 и 11, были построены с помощью пакета программ Microcal™ Origin Version 6.0.

Анализ морфогенетических характеристик и пространственных соотношений систем (популярнейшей) разномасштабных разрывных структур является неотъемлемой частью концептуального и числового моделирования процессов фильтрации рудоносных флюидов и транспорта природно-техногенных радионуклидов, происходящих в трехмерном трещинно-поровом пространстве в различной степени деформированных и метасоматически измененных кристаллических пород.

Для геометризации систем разрывных нарушений и расчета их фильтрационной способности используются разные подходы. Так, например, проект SR-97 компании SKB (Швеция) был направлен на сравнение времени продвижения фронта загрязнения при утечке радионуклидов из канистры для трех моделей геометрии сети трещин в блоке пород: дискретной трещинной сети (DSN – discrete fracture network), стохастически организованного континуума (CS – stochastic continuum) и сети каналов (CN – channel network). Сравнительный анализ материалов моделирования показал (Selroos *et al.*, 2002), что значения фильтрационно-транспортных параметров для трех моделей близки. При этом граничные условия, распределение в пространстве путей миграции вещества и их фильтрационные свойства определяют результаты моделирования.

Конфигурация системы трещинных проводников, развитых в конкретных геологических обстановках, может различаться, но как установлено в (Selroos *et al.*, 2002), эти различия значимого влияния на моделируемые фильтрационные характеристики массивов пород не оказывают. Поэтому представляется правомерным использовать полученные нами данные по удельной плотности и удельной длине неоднородностей всех масштабных уровней (километры, метры, сантиметры и миллиметры) Уртуйского гранитного массива для создания концептуальных и числовых моделей фильтрационно-транспортных процессов в трехмерном трещинном пространстве кристаллических пород. Установленные линейные отношения этих геометрических параметров приведены на фиг. 12.

На графике наблюдается близкая к линейной зависимость удельной плотности и удельной длины неоднородностей от их масштаба. Эти данные показывают, что наличие у исследователя информации только о трещинах метрового уровня, позволяет создавать концептуальные и расчетные фильтрационно-транспортные модели, учитыва-



Фиг. 12. Графики зависимости удельной плотности (а) и удельной длины (б) от масштаба флюидопроводящей неоднородности.

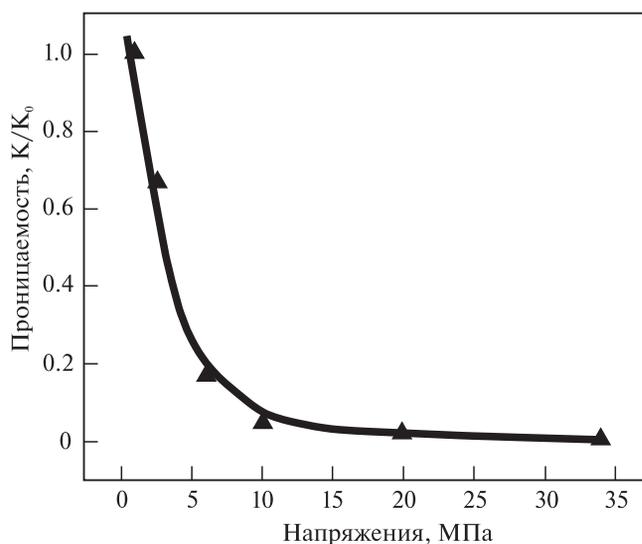
ющие широкий спектр разрывных нарушений, их ориентировку в пространстве и геометрические характеристики.

Поскольку трещинная проницаемость кристаллических пород превышает проницаемость их твердой матрицы, основные усилия направляются на изучение и моделирование процессов транспорта вещества в дискретных трещинных системах. При этом постоянно возникает вопрос о корректности прогноза местоположения флюидопроводящих трещинных систем в трехмерном геологическом объеме, если за основу берутся данные поверхностных площадных исследований и на обнажениях пород или разрозненная информация по разрезам скважин. Относительно недавно для решения этой задачи стала привлекаться методология фрактального анализа (Walsh, Watterson, 1993; Barton, 1995; Margolin *et al.*, 1998; Falconer, 1997; и др.), которая хорошо себя зарекомендовала при изучении территорий для размещения объектов ядерного топливного цикла (Agterberg *et al.*, 1996; Paredes, Elorza, 1999; Billaux *et al.*, 1989).

Наряду с этим известно, что существенное влияние на характер фильтрационно-транспортных процессов в трехмерном трещинно-поровом пространстве оказывают вариации напряженно-деформированного состояния массива пород (Rock fractures..., 1996; Olsson, Barton, 2001; и др.). Это утверждение иллюстрирует диаграмма, построенная по результатам пакерных тестов (фиг. 13).

Диаграмма отражает самые общие закономерности, но очевидно, что в естественном залегании скорость фильтрации и структура флюидного

потока в трещиноватых породах определяется реакцией (откликом) системы флюидопроводящих трещин на внешнее поле напряжений. Иными словами, фильтрационная способность разрывных структурных парагенезисов зависит не только от морфогенетических (геометрических) особенностей слагающих элементов (что является предметом данной статьи), но и от их ориентировки в изменяющемся поле тектонических напряжений. Эти вопросы предполагается рассмотреть в следующей статье.



Фиг. 13. Характер изменения фильтрационной способности (K и K_0 – эффективный (конечный) и исходный коэффициенты проницаемости, соответственно) трещиноватых пород в естественном залегании как функции внешнего напряжения (по Liu *et al.*, 2000).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последовательное изложение методологии изучения ориентировки и морфогенетических характеристик разрывных систем четырех масштабных уровней (километры, метры, сантиметры и миллиметры) на одной площади (Уртуйский гранитный массив в обрамлении Стрельцовской урановмещающей кальдеры в Юго-Восточном Забайкалье) проведено впервые в российской практике структурно-геологических исследований. Для этих неоднородностей установлена статистическая взаимосвязь с такими важнейшими показателями проницаемости массива пород, как удельная плотность и удельная длина нарушений. Изменения этих показателей для различных масштабных уровней разрывных нарушений демонстрируют близкую к линейной зависимость. Поэтому недостаточность исходных данных полевых и лабораторных исследований, связывающих основные масштабы флюидопроводящих разрывно-трещинных систем, может быть компенсирована наличием информации об ориентировке в пространстве и геометрических параметрах разрывов одного-двух масштабных уровней. Этот вывод согласуется с результатами моделирования фильтрационно-транспортных процессов в трещинных системах различной геометрии (дискретной трещинной сети, стохастически организованного континуума и сети каналов) и с методологией фрактального анализа. При этом следует учитывать, что отклик раздробленной многочисленными разрывами среды на внешнее динамическое воздействие зависит от множества взаимосвязанных факторов, отражающих состав, свойства и состояние как самих пород, так и просачивающихся флюидов. Следовательно, для корректного прогноза условий миграции рудоносных гидротермальных растворов и/или загрязняющих веществ необходимо не только определить морфоструктурный облик и проводящую способность разномасштабных разрывов, но и реконструировать динамику их изменения в поле напряжений (тектоническом и/или техногенном), т. е. выявить совокупность тектонодинамических факторов, контролирующих условия протекания фильтрационно-транспортных процессов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность А.А. Пэку (ИГЕМ РАН) и Л.А. Сим (ИФЗ РАН) за плодотворные дискуссии и ценные советы в процессе подготовки материалов статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы 0136-2018-0016 государственного задания ИГЕМ РАН “Развитие интегрированной информационной системы для

пространственно-временного моделирования рудообразующих систем месторождений стратегических металлов на основе ГИС технологий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакшеев И.А., Голубев В.Н., Прокофьев В.Ю., Вигасина М.Ф., Япаскерт В.О., Брызгалов И.А.* Турмалин кварцевых линз Уртуйского гранитного массива (Стрельцовское рудное поле, Читинская область) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2012. № 1. С. 18–28.
- Голубев В.Н.* Возраст рассеянной урановой минерализации в породах обрамления Стрельцовского урановорудного поля и Ямского участка (Восточное Забайкалье) // Геология руд. месторождений. 2011. Т. 53. № 5. С. 450–461.
- Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс /М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко. Отв. ред. В.И. Кейлис-Борок. М.: Наука, 1987. 100 с.
- Лаверов Н.П., Петров В.А., Величкин В.И., Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Дьяур Н.И., Бурмистров А.А., Леспинас М., Саус Дж., Кюне М., Леруа Дж.Л.* Сравнительный анализ фильтрационных свойств гранитов на макро- и микроуровне в связи с изоляцией радиоактивных отходов // Геоэкология. 2004. № 4. С. 293–309.
- 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. С. 27–33.
- Петров В.А., Ребецкий Ю.Л., Полуэктов В.В., Бурмистров А.А.* Тектонофизика гидротермального рудообразования: пример молибден-уранового месторождения Антей, Забайкалье // Геология руд. месторождений. 2015. Т. 57. № 4. С. 327–350.
- Петров В.А., Леспинас М., Полуэктов В.В., Устинов С.А., Минаев В.А.* Ремасштабирование флюидопроводящих разрывных структур // ДАН. 2017. Т. 472. № 4. С. 429–432.
- Полуэктов В.В., Петров В.А., Андреева О.В., Устинов С.А., Прокофьев В.Ю.* Структурно-петрологические особенности рудовмещающих пород Стрельцовской кальдеры и ее обрамления (ЮВ Забайкалье) // Всероссийская конференция, посвященная 120-летию со дня рождения ак. А.Г. Бетехтина. М.: ИГЕМ РАН, 2017. С. 160–164.
- Садовский М.А.* О распределении размеров твердых отдельностей // Доклады АН СССР. 1983. Т. 269. № 1. С. 69–72.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2003. 244 с.
- Устинов С.А., Петров В.А.* Применение ГИС-технологий для микроструктурного анализа в геологии // Геоинформатика. 2015. № 2. С. 33–46.
- Чернышев С.Н.* Движение воды по сетям трещин. М.: Недра, 1979. 141 с.
- Agterberg F.P., Cheng Q., Brown A., Good D.* Multifractal modelling of fractures in the Lac du Bonnet batholith,

- Manitoba // Computers and Geosciences. 1996. Vol. 22. N 5. P. 497–507.
- Almeida J.A., Soares A., Pereira M.J.* Upscaling of permeability: implementation of a conditional approach to improve the performance in flow simulation // Society of Petroleum Engineers. 1996. N 35490. 12 p.
- Barnhoorn A., Cox S.F., Robinson D.J., Senden T.* Stress- and fluid-driven failure during fracture array growth: implications for coupled deformation and fluid flow in the crust // Geology. 2010. Vol. 38. N 9. P. 779–782.
- Barton C.C.* Fractal analysis of scaling and spatial clustering of fractures // In: Fractals in the Earth Sciences. Barton C.C., La Pointe P.R. (Eds.). New York: Plenum Press, 1995. P. 141–178.
- Billaux D., Chiles J.P., Hestir K., Long J.* Three-dimensional statistical modelling of a fractured rock mass: an example from the Fanay-Augeres mine // International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics. Abstracts. 1989. N 26 (3/4). P. 281–299.
- Bonnet E., Bour O., Odling N.E., Davy P., Main I., Cowie P., Berkowitz B.* Scaling of fracture systems in geological media // Reviews of Geophysics. 2001. N 39. P. 347–383.
- Boullier A.M.* Fluid inclusions: tectonic indicators // Journal of Structural Geology. 1999. N 21. P. 1229–1235.
- Bour O., Davy P.* Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution // Water Resources Research. 1997. N 33. P. 1567–1583.
- Bour O., Davy P., Darcel C., Odling N.* A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway) // Journal of Geophysical Research. B: Solid Earth. 2002. N 107. doi:10.1029/2001JB000176.
- Caine J.S., Evans J.P., Forster C.B.* Fault zone architecture and permeability structure // Geology. 1996. N 24. P. 1025–1028.
- Castaing C., Halawani M.A., Gervais F., Chilès J.P., Genter A., Bourguin B., Ouillon G., Brosse J.M., Martin P., Genna A., Janjou D.* Scaling relationships in intraplate fracture systems related to Red Sea rifting // Tectonophysics. 1996. N 261. P. 291–314.
- Cathelineau, M., Lespinasse, M., Boiron, M.C.* Fluid inclusions planes: a geochemical and structural tool for the reconstruction of paleofluid migration // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Virginia Technology, USA. 1994. 158 p.
- Dersowitz W., Redus K., Wallmann P., Lapointe P., Axelson C.-L.* The implication of fractal dimension in hydrogeology and rock mechanics. Version 1.1. SKB Technical Report 92-17. Stockholm, 1992. 62 p.
- Dewandel B., Maréchal J.-C., Bour O. et al.* Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and effective porosity at watershed scale in deeply weathered crystalline aquifers // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 416–417. P. 83–97.
- Dezayes C., Genter A., Valley B.* Structure of the low permeable naturally fractured geothermal reservoir at Soultz // Comptes Rendus Geoscience. 2010. N 342. P. 517–530.
- Ehlen J.* Fractal analysis of joint patterns in granite // International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics. 2000. N 7. P. 909–922.
- Empereur-Mot L., Villemain T.* Fractal properties of fragmentation and stochastic fracturing processes: geometrical 3D approach by OBSIFRAC model // Comptes Rendus Geoscience. 2002. N 334. P. 127–133.
- Falconer K.* Techniques in Fractal Geometry. Chichester: John Wiley and Sons, 1997. 256 pp.
- Guéguen Y., Diennes J.* Transport properties of rocks from statistics and percolation // Mathematical Geology. 1989. N 21. P. 1–13.
- Guéguen Y., Ravalec M.L., Ricard L.* Upscaling: effective medium theory, numerical methods and the fractal dream // Journal of Pure and Applied Geophysics. 2006. N 163. P. 1175–1192.
- Kruhl J.H.* Fractal-geometry techniques in the quantification of complex rock structures: A special view on scaling regimes, inhomogeneity and anisotropy // Journal of Structural Geology. 2013. N 46. P. 2–21.
- Le Garzic E., De L'Hamaide T., Diraison M. et al.* Scaling and geometric properties of extensional fracture systems in the proterozoic basement of Yemen. Tectonic interpretation and fluid flow implications // Journal of Structural Geology. 2011. N 33. P. 519–536.
- Lespinasse M., Pecher A.* Microfracturing and regional stress field: a study of preferred orientations of fluid inclusion planes in a granite from the Massif Central, France // Journal of Structural Geology. 1986. N 8. P. 169–180.
- Lespinasse M.* Are fluid inclusion planes useful in structural geology? // Journal of Structural Geology. 1999. N 21. P. 1237–1243.
- Lespinasse M., Désindes L., Fratzczak P., Petrov V.* Microfractural mapping of natural cracks in rocks: implications on fluid transfers quantification in the crust // Journal of Chemical Geology. Special Issue. 2005. Vol. 223. P. 170–178.
- Liu J., Elsworth D., Brady B.H., Muhlhaus H.B.* Strain-dependent fluid flow defined through rock mass classification schemes // Rock Mechanics and Rock Engineering Journal. 2000. Vol. 33. N 2. P. 75–92.
- Mallet J.-L.* Elements of Mathematical Geology: the GeoChron Model. EAGE Publications. 2014. 374 p.
- Margolin G., Berkowitz B., Scher H.* Structure, flow, and generalized conductivity scaling in fracture networks // Water Resources Research. 1998. N 34 (9). P. 2103–2121.
- Odling N.E., Roden J.E.* Contaminant transport in fractured rocks with significant matrix permeability, using natural fracture geometries // Journal of Contaminant Hydrology. 1997. N 27. P. 263–283.
- Olsson R., Barton N.* An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2001. N 38. P. 317–329.
- Paredes C., Elorza F.J.* Fractal and multifractal analysis of fractured geological media: surface-subsurface correlation // Computer and geosciences. 1999. N 25. P. 1081–1096.
- Park C.K., Vandergraaf T.T., Drew D.J., Hahn P.S.* Analysis of the migration of nonsorbing tracers in a natural fracture in granite using a variable aperture channel model // Journal of Contaminant Hydrology. 1997. N 26. P. 97–108.
- Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V., Cuney M., Nasimov R.M., Hammer J., Schukin S.I.* Stress-time context of fault permeability at the Krasnokamensk Area, SE Transbaikalia // Journal of Physics. 2013. Conference Series: 416. 012018.

Reeves D., Parashar R., Pohll G.C., Rosemary B., Willoughby K. The use of discrete fracture network simulations in the design of horizontal hillslope drainage networks in fractured rock // *Engineering Geology*. 2013. N 163. P. 132–143.

Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications. Washington, D.C.: Nat. Acad. Press, 1996. 551 p.

Selroos J.-O., Walker D.D., Ström A., Gylling B., Follin S. Comparison of alternative modeling approaches for ground-

water flow in fractured rock // *Journal of Hydrology*. 2002. N 257. P. 174–188.

Smith D.L., Evans B. Diffusional crack healing in quartz // *Journal of Geophysical Research*. 1984. N 89. P. 4125–4135.

Walsh J.J., Watterson J. Fractal analysis of fracture patterns using the standard box-counting technique: valid and invalid methodologies // *Journal of Structural Geology*. 1993. Vol. 15. N 12. P. 1509–1512.

Scale Effect in a Fluid-Conducting Fault Network

V.A. Petrov^{1,*}, M. Lespinasse², V.V. Poluektov¹, S.A. Ustinov¹, V.A. Minaev¹

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017, Russia*

²*Faculte des Sciences, Geosciences, Universite Henri Poincare Nancy 1, UMR CNRS 7566 G2R, BP 239, 54506 Vandoeuvre les Nancy Cedex*

*E-mail: vlad243@igem.ru

The data presented in the article consistently outlines the methodology for studying the orientation and morphogenetic characteristics of fracture systems of four scale levels including kilometers, meters, centimeters and millimeters. The Urtuisky granite massif, located in the South-Eastern Transbaikalia to the west of the Streltsovsky caldera, containing uranium deposits unique in their reserves was chosen as the object of the research. The massif is composed of Late Riphean granites and granite-gneisses, affected by dynamometamorphic and hydrothermal-metasomatic transformations in various degrees, and dissected by numerous faults with traces of fluid activity of various tectogenesis episodes. The interrelation between such geometrical parameters of fractures systems as specific density and specific length was established. It is shown that such geostructural data should be used for conceptual and numerical modeling of fluid filtration and radionuclides transport processes occurring in a three-dimensional fractured-pore space of crystalline rocks, as applied to the reconstruction and modeling of uranium ore formation and use of geological space for radioactive materials isolation.

Keywords: fault systems, cracks, microcracks, scale effect, Urtui granite massif, fluid inclusion planes, porosity, permeability

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016-77706143-14>