

РАЗВИТИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СТРУКТУР ГРАНИТОИДОВ: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРИКЛАДНОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Розглянуто питання теорії розвитку орієнтованих структур гранітоїдів. Встановлено, що утворення таких структур викликано двома видами кінематичних деформацій: у гранітах із плоскопаралельним зсувом і зміною просторового положення головних осей еліпсоїда деформацій, і з чистим зсувом у мігматітах при незмінному загальному плані деформації. Регіональний характер процесів деформації призводить до закономірного зв'язку між елементами будови масивів і анізотропією фізико-механічних властивостей гранітоїдів, що служить надійною основою прогнозування їхніх властивостей за даними мікроструктурного аналізу.

DEVELOPMENT OF THE GRANITOIDS ORIENTED STRUCTURES: THE THEORY, EXPERIMENTAL RESULTS AND APPLICATION

The problems of the theory of the oriented frame development in granitoids are considered. It is established, that the derivation of such frames is called by two kinds of kinematics deformations: in granites with parallel plate shift and change of a strain ellipsoid main axis's attitude, and with pure shift in migmatites at an invariable general plan of deformation. The regional character of processes of deformation results in an objective interelement coupling of a constitution of the arrays and anisotropy of granitoids physical-mechanical properties, that serves the reliable basis of prediction of their properties under the structure analysis data.

В результате выполненных структурных исследований ориентированных образцов гранитоидов, отобранных на ряде массивов Украины (докембрийские граниты, Украинский щит), России (девонские граниты Джойского интрузивного комплекса, Хакасская АР), Индии (протерозойские граниты Хайдарабадского гранитного массива, штат Андхра-Прадеш), а также анализа некоторых данных тектонического строения Западной Австралии [1] была установлена новая, неизвестная ранее, закономерность пространственного распределения в гранитах кварца и дефектов его строения [2,3].

Сущность данной закономерности, обусловленной воздействием на застывающий массив силы Кориолиса, заключается в том, что в кварце гранитов субвертикальные «залеченные» микротрещины (плоскости газово-жидких включений – ГЖВ) образуют с направлением вектора линейности $L_{пр}$ кварцевых агрегатов постоянный угол, среднестатистическое значение которого составляет $35 \pm 5^\circ$, причем для Северного полушария Земли величина данного угла имеет отрицательное значение, а для Южного полушария – положительное.

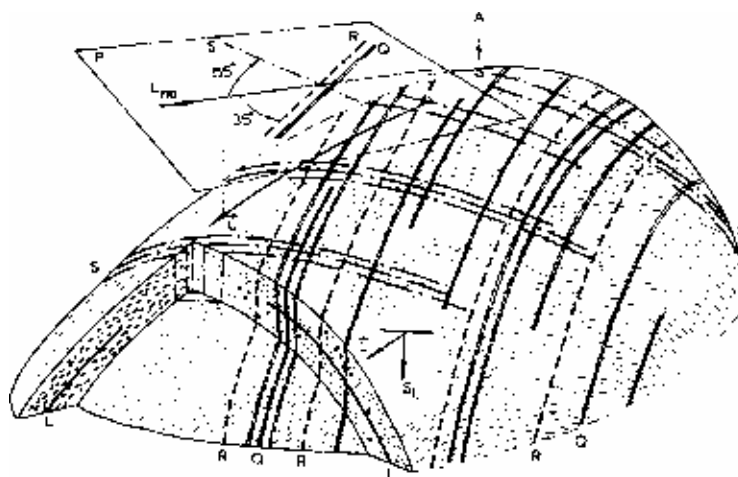
Установлено, что простирание системы вертикальных трещин разрыва Q (номенклатура Г.Клооса [4]) в гранитах совпадает с простиранием системы «залеченных» интрагранулярных микротрещин в зернах кварца (плоскость R).

Соотношение между элементами строения гранитного массива (линейностью минеральных зерен $-\vec{L}$, субвертикальными микротрещинами в кварцевых зернах – плоскостью R и вертикальными макротрещинами S и Q) приведены на рис.1.

Согласно современным представлениям [4-9], первичные трещины – S , Q , L и D возникают в гранитах в момент консолидации (затвердевания) охлаждающейся магмы, причем их образование начинается еще на стадии прототектоники жидкой фазы становления интрузивного массива.

В работе [10] рассмотрен механизм образования первичных трещин в гранитных массивах в условиях деформаций плоскопараллельного сдвига. В частности, отражена роль таких факторов, как свойства расплава при различных P - T параметрах, действие сил Кориолиса, фазовый переход в кварце и др., совокупное влияние которых приводит, в итоге, к развитию в горной породе ориентированной макроструктуры (пространственному распределению микро- и макротрещин, линейности агрегатов минеральных зерен и аномалии гравитационного поля над гранитными массивами).

В меньшей степени в этих публикациях были затронуты вопросы, касающиеся процесса развития в гранитах ориентировки по внутреннему строению – ориентировки кристаллических решеток породообразующих минералов.



A – апикальная часть купола; \vec{L} – направление вектора линейности минеральных агрегатов; $L_{пр}$ – горизонтальная проекция вектора \vec{L} ; S_L – направление падения плоскости уплощения минеральных агрегатов; R – плоскость расположения газожидких включений в кварце; S – трещины сжатия; Q – трещины отрыва; L – пластовые трещины

Рис.1 - Макроструктура гранитного массива

В этой связи целесообразно рассмотреть механизм образования ориентировки по внутреннему строению, оказывающей, несомненно, существенное влияние на анизотропию физико-механических свойств гранитоидов.

Изучение микроструктуры этих пород, в частности, гранитов и мигматитов гранитного состава, с помощью универсального столика микроскопа показало, что ориентировку по внутреннему строению в процессе формирования массивов пород вышеназванной группы приобретает лишь кварц. Остальные породообразующие минералы (полевые шпаты, слюды, магнетит и др.) обладают ориентировкой по форме зерен, которая является следствием вязкого течения магмы (в гранитах) или мигмы (в мигматитах).

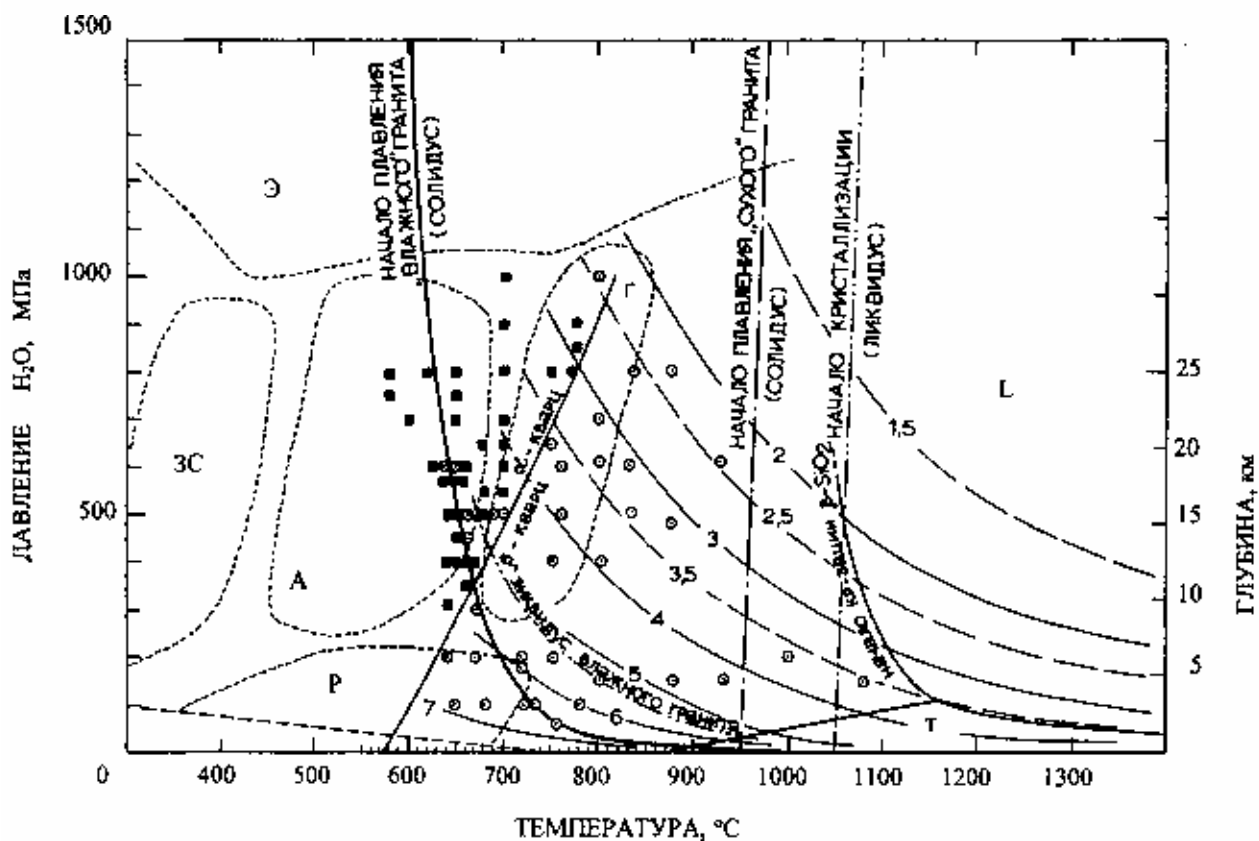
При исследовании газовой-жидких включений в породообразующих минералах методами термобарогеохимии установлено, что кристаллизация гранитной магмы (солидус) начинается в интервале температур 750-1050 °С и давлений 150-800 МПа [11-13]. Вязкость расплава при этом составляет 10^2 - 10^5 П (рис.2), что вполне достаточно для поддержания в расплаве тепловой конвекции Рэлея-Бенара [14], начавшейся в условиях ликвидуса ($T > 1050$ °С, $P = 150$ -800 МПа).

Течение расплава при данных термодинамических параметрах (рис.2) уже не соответствует характерной для условий ликвидуса модели ньютоновской жидкости, когда напряжение сдвига τ прямо пропорционально коэффициенту сдвиговой вязкости η и градиенту скорости v . Это обусловлено тем, что по мере охлаждения расплава увеличивается концентрация суспендированных в нем частиц (кристаллов и агрегатов минеральных зерен), в результате чего резко возрастает вязкость суспензии [15] (рис.2).

В субсолидусных условиях, т.е. при $P = 150$ -160 МПа и $T = 650$ -800 °С, течение суспензии для гранитов, вероятнее всего, соответствует модели Бингама [16,17]. Согласно работе [15], свойства бингамовской жидкости таковы, что эти жидкости могут упруго деформироваться в течение короткого промежутка времени, а напряжения сдвига в них долго не исчезают после снятия нагрузки. Поэтому, в конце фазы кристаллизации, напряжения (стресс), вызванные деформациями плоскопараллельного сдвига (действие сил Кориолиса) будут сохраняться длительное время даже после прекращения движения суспензии (магмы) и исчезновения сдвигающих сил.

Согласно Р.Мюллеру и С.Саксене [18] освобождение от напряжений (стресса) в атомистическом смысле может произойти только в результате реализации напряжения через трансляционное скольжение или перекристаллизационное течение. По этой причине в породе, находящейся в условиях стресса, в минералах будет развиваться ориентировка кристаллических решеток – ориентировка по строению.

Общеизвестно, что кварц, кристаллизуется в последнюю очередь из гранитного расплава в виде высокотемпературной модификации (β -кварц). В процессе вязкого течения вначале он приобретает ориентировку по форме, в виде удлиненно-уплощенных агрегатов зерен, а на стадии кристаллизации – ориентировку по строению. Анализ ориентировки микроструктурных диаграмм позволил установить, что кварц гранитов Украинского щита имеет ориентировку по внутреннему строению, особенность которой заключается в том, что максимумы фигуративных точек выходов оптических осей на структурных диаграммах располагаются субпараллельно вектору линейности \vec{L} минеральных агрегатов (рис.3, а). Такая ориентировка кварца обусловлена свойством его кристаллической решетки располагаться меньшим модулем упругости параллельно одностороннему давлению (E_{\max} в кварце совпадает с оптической осью). В условиях высоких P и T граниты обладают значительной пластичностью и сдвиговые деформации в них, носящие необратимый характер, продолжаются после фазового перехода кварца в низкотемпературную модификацию (α -кварц).



светлые кружочки – P - T условия образования ГЖВ в кварце гранитов; темные квадратики – то же для мигматитов; кривые с цифрами – изологарифмы вязкости расплава; области, ограниченные пунктирными линиями – фации метаморфизма: ЗС – зеленосланцевая, Р – роговиковая, А – амфиболитовая, Г – гранулитовая, Э – эклогитовая; L – расплав, Т – тридимит

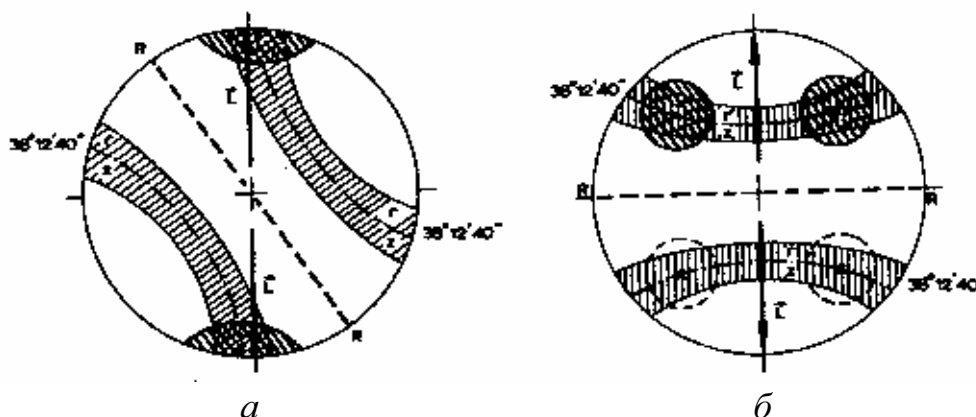
Рис.2 - Диаграмма P - T условий образования магматических и метаморфических пород гранитного состава (построена по данным работ [11-13, 16-18, 21, 24-28, 30])

Этому в значительной мере способствует аномально низкая устойчивость кварца к деформациям вплоть до температуры 570-470 °C [19], а также тот факт, что модуль сдвига гранитов, находящихся в условиях всестороннего сжатия, с ростом дифференциального напряжения уменьшается и при его величине, равной 2 МПа становится ниже, чем при атмосферном давлении [20]. Следы интенсивных сдвиговых деформаций отчетливо заметны под микроскопом в виде волнистого угасания кварца и широкого развития пертита и микропертита – взаимного прорастания альбита и обычно преобладающего микроклина. Считают [21], что образование таких структур тесно связано с деформациями, испытываемыми породами при сдвиге. Под действием горизонтальных кориолисовых сил пространственное положение осей эллипсоида деформаций постоянно изменяется и к моменту инверсионного $\alpha \leftrightarrow \beta$ перехода кварца малая ось S эллипсоида составляет с направлением линейности угол, равный $35 \pm 5^\circ$. Микротрещины в кварце, объем которого при $\alpha \leftrightarrow \beta$ переходе скачкообразно уменьшается на 0,86 %, развиваются в направлении максимального сжимающего напряжения, т.е. параллельно оси S эллипсоида деформаций.

Таким образом, условия кристаллизации гранитной магмы способствуют образованию ориентировки по форме зерен и их внутреннему строению, а также зарождению в кварцевых зернах еще на стадии прототектоники жидкой фазы однонаправленных микродефектов строения (плоскостей ГЖВ). При этом процесс развития микродефектов, которые затем реализуются в макротрещины при деформациях, связанных с медленным подъемом консолидировавшегося гранитного плутона в верхние структурные этажи земной коры [22, 23], ограничен условиями $\alpha \leftrightarrow \beta$ перехода и происходит в области температур 770-470 °С (рис.2). Это согласуется с данными, полученными на основании детального изучения характера трещин разрыва и минерального состава их заполнителей в архейских гранитах штата Онтарио (Канада) [23].

Совершенно иначе протекает процесс развития ориентированных структур в мигматитах – метаморфических породах в основном гранитного состава, образовавшихся в результате частичного плавления кристаллических сланцев или их «пропитывания» гранитным веществом [24].

Настоящими исследованиями установлено, что микроструктура мигматитов существенно отличается от микроструктуры гранитов (рис.3, б). Это можно объяснить следующим.



R – плоскости наилучшего вертикального раскола; \vec{L} – линейность агрегатов минеральных зерен; грубозаштрихованные области – зоны концентрации оптических осей кварца; тонкозаштрихованные области – пояса граней ромбоэдров r и z

Рис.3 - Обобщенная микроструктурная диаграмма особенностей внутреннего строения кварца гранитов (а) и мигматитов (б)

Характерная для мигматитов ориентированная структура может образоваться только при деформациях чистого сдвига, когда пространственное положение осей эллипсоида деформаций остается неизменным в ходе деформации. Формирование мигматитов из реликтовой породы (субстрата) происходит в условиях длительного действия высоких температур и давлений [25, 26], что оказывает значительное влияние на этот процесс.

Рассмотрим влияние P и T условий, а также некоторых физико-механических свойств породы на механизм развития ориентированной структуры мигматитов.

Термобарометрия по газовой-жидким включениям в породообразующих ми-

нералах этих пород дает следующие термодинамические параметры их образования: $P = 300-1000$ МПа, $T = 550-800$ °С [24-28]. Из диаграммы $P-T$ условий (рис. 2), на которой эти параметры изображены в виде затемненных квадратов, следует, что формирование мигматитов происходит в условиях амфиболитовой и частично гранулитовой фаций метаморфизма. Важно отметить, что подавляющее большинство квадратов располагается на диаграмме между кривой начала плавления «влажного» гранита (плавления гранита в присутствии H_2O) и линией инверсионного $\alpha \leftrightarrow \beta$ перехода кварца. Это означает, что процесс мигматитизации может сопровождаться частичным плавлением, если субстрат содержит некоторое количество воды (1 мас.% по данным работы [28]). Частичное плавление субстрата признается большинством исследователей этой группы пород [24-28]. Наличие небольшого количества расплавленного материала (лейкосомы) существенно увеличивает пластичность пород. В результате псевдовязкого течения вещества в направлении, перпендикулярном одностороннему горизонтальному давлению, которое на глубинах формирования мигматитов превышает вертикальное в 1,5-3 раза [29], в породах возникает ориентировка по внешней форме зерен. При этом скорость псевдовязкого течения очень мала для того, чтобы в движущемся материале возникли силы Кориолиса, величина которых была бы достаточной, чтобы привести к плоскопараллельному сдвигу и изменению общего плана деформации. Вследствие этого, в пластичной породе необратимые деформации, включающие одностороннее течение, катаклиз (т.е. дробление, грануляция и растрескивание отдельных зерен) и трансляционное скольжение могут осуществляться только по схеме, характерной для деформации чистого сдвига.

Прочность пород, качественно оцениваемая как сопротивление разрушению при непрерывном течении и трещинообразовании, в значительной мере зависит от вида структурных связей между элементами ее строения. Разрушение породы, поэтому, происходит по направлениям наибольшего ослабления структурных (внутренних) связей, которые в полиминеральной породе определяются межзерновыми и внутрикристаллическими силами сцепления. На диаграмме $P-T$ условий (рис. 2) видно, что значения термодинамических параметров процесса мигматитизации находятся вблизи линии инверсионного $\alpha \leftrightarrow \beta$ перехода кварца. Хотя температурные условия еще недостаточны для перехода этого минерала в высокотемпературную модификацию, однако, из-за низкой его устойчивости к деформациям в области температур 470-800 °С, как отмечалось выше, трещинообразование в кварцевых зернах может происходить даже при небольших напряжениях. Микротрещины при этом также как и в кварце гранитов развиваются в направлении максимального сжимающего напряжения (параллельно малой оси C эллипсоида деформаций).

Так как главные оси эллипсоида в процессе пластического течения не изменяют своего положения в пространстве, микро- и макротрещины разрыва во всем объеме деформируемой породы будут ориентироваться перпендикулярно линейности агрегатов минеральных зерен.

Следует отметить, что микроразрывы в зернах кварца мигматитов так же, как и в кварце гранитов, развиваются по граням ромбоэдров r и z , т.е. по наибо-

лее ослабленным направлениям в кристаллической решетке данного минерала [30, 31]. Об этом свидетельствует тот факт, что максимумы выходов фигуративных точек оптических осей кварца (рис.3, б) располагаются только в пределах пояса граней ромбоэдров.

В начальной стадии регионального метаморфизма, в результате деформации, кварц приобретает ориентировку по строению. Поскольку сопровождающая процесс мигматитизации деформация чистого сдвига является коаксиальной, то она может привести только к развитию структур с высокой орторомбической симметрией [33]. Поэтому при ламинарном скольжении, которое, как отмечалось выше, для такого процесса совершается по двум системам плоскостей, оптические оси кварца ориентируются параллельно круговым сечениям эллипсоида деформаций. Кристаллическая решетка кварца, таким образом, занимает такое положение в пространстве, при котором направление наибольшего ослабления структурных связей в ней приближенно совпадает с направлением максимального сжимающего напряжения, т.е. с осью C эллипсоида деформации. При высоких P и T , близких к точке инверсионного $\alpha \leftrightarrow \beta$ перехода, в кварце образуются микротрещины, параллельные граням ромбоэдров r и z .

Существенные различия в характере процессов деформирования гранитов и мигматитов позволяют сформулировать следующее.

Для гранитов (рис.3, а) характерна моноклиная симметрия ориентировки кристаллической решетки кварца. Такой тип симметрии связывают с деформациями простого (плоскопараллельного) сдвига [32]. Образование микротрещин в кварце здесь связано с переходом данного минерала в низкотемпературную модификацию, сопровождающуюся скачкообразным, как уже отмечалось выше, уменьшением объема на 0,86 %. При этом внутренние напряжения в породе в значительной мере возрастают [33] и сохраняются в гранитном массиве длительное время. В результате граниты становятся напряженными породами

В мигматитах трещинообразование в кварце, связанное с катаклизмом при деформации, уменьшает внутреннее напряжение в породе. Экспериментально установлено, что доля кварца с дефектами строения в мигматитах составляет, около 63 %, а доля пузырьков в плоскости «залеченных» микротрещин – 65 %. В кварце гранитов указанные величины не превышают 50 %, однако размеры газово-жидких включений в них на порядок выше, чем в мигматитах, т.е. 10 мкм против 1-3 мкм. Вследствие этого, а также из-за внутренних напряжений граниты легче раскалываются под действием прилагаемых нагрузок, чем мигматиты, несмотря на то, что количество кварца с дефектами в них меньше.

Деформационные структуры гранитов и мигматитов в значительной мере отличаются друг от друга, как по характеру, так и по генезису, и могут служить надежным критерием отличия магматических пород от метаморфических. На микро- и макроуровне также наблюдается значительное изменение характера разрушения этих в общем идентичных по минералогическому составу пород под действием прилагаемых нагрузок (взрывных, механических), что обусловлено различием их ориентированных структур.

Выводы

Развитие ориентированных структур в гранитоидах связано с двумя видами кинематических деформационных процессов, а именно: с чистым сдвигом, когда пространственное положение главных осей эллипсоида деформаций остается неизменным, и с плоскопараллельным (простым) сдвигом, при котором происходит изменение общего плана деформации.

Свойства гранитов (аномалия гравитационного поля, закономерность пространственного распределения кварцевых зерен и дефектов их строения и механизм образования в них вертикальных трещин) обусловлены специфическим, присущим только данным породам, режимом кристаллизации, а также деформациями плоскопараллельного сдвига, который вызван несоосными горизонтальными силами Кориолиса, действующими на движущийся магматический материал.

Возникновение закономерной ориентировки минеральных агрегатов и трещин, секущих мигматиты гранитного состава, является следствием происходящего при высоких давлениях и температурах процесса деформации, характерного для чистого сдвига. Этот процесс сопровождается однородным течением частично расплавленного вещества, дроблением, грануляцией, растрескиванием отдельных зерен и трансляционным скольжением, вызывающим переориентировку кристаллических решеток породообразующих минералов.

Региональный характер обоих деформационных процессов приводит к закономерной связи между ориентировкой элементов строения гранитов и мигматитов и анизотропией их физико-механических свойств. В пределах каждой разновидности пород это объясняет большое сходство структуры разновозрастных и значительно удаленных друг от друга массивов, создает надежную теоретическую основу для прогнозирования свойств гранитов и мигматитов по данным микроструктурного анализа.

В заключение отметим несколько важных моментов, касающихся прикладного значения полученных в ходе исследований результатов.

Закономерности развития ориентированных структур дают возможность по-новому взглянуть на проблему происхождения гранитоидов, активно обсуждаемую более ста лет [34], как сторонниками, так и противниками их магматического генезиса.

С гранитами, кристаллизовавшимися из магмы, пространственно и генетически связаны месторождения цветных металлов, редких и рассеянных элементов; мигматиты гранитного состава в этом отношении стерильны. Кроме того, гранитоиды сами по себе являются ценным сырьем для получения щебня, блоков декоративного и облицовочного камня.

В этой связи, интерпретация данных микроструктурного анализа позволят:

- однозначно определить генезис гранитоидов по характеру узора на структурной ориентирной диаграмме;
- установить не только направление главных трещин интрузии, но и идентифицировать их по морфологическим особенностям, оказывающим существенное влияние на сейсмический эффект и характер разрушения пород энергией взрыва;

- определить направление наилучшего вертикального раскола, используемое при добыче монолитных блоков пород;
- установить координаты апикальной части купола гранитного массива и определить направления главных сжимающих напряжений в гранитах, что дает возможность прогнозировать оптимальное направление фронта развития горных работ при разработке месторождения;
- оказать неоценимую помощь в решении ряда сложных вопросов глобальной тектоники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хиллис Е.С. Тектоническое строение Австралии// В кн.: Вопросы современной зарубежной тектоники. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С.223-240.
2. Кутузов Б.Н., Кратковский И.Л., Мяделец Б.Н. Закономерность распределения в гранитах кварцевых зерен и дефектов их строения// Изв.вузов. Горн.журн. – 1982. – № 1. – С.9-11.
3. Кутузов Б.Н., Мяделец Б.Н., Кратковский И.Л. Механизм образования вертикальных трещин в токовских гранитах Украинского щита// Изв.вузов. Горн. журн. – 1984. – № 1. – С.1-4.
4. Cloos, H. Tektonik und Magma// Abh.d. Preuss. Geol. Landesanst, N.F. – 1922. – Н.89. – 285 s.
5. Болк Р. Структурные особенности изверженных горных пород. – М.: Госгеолтехиздат, 1946. – 212 с.
6. Ажгирей Г.Д. Структурная геология. – М.: Изд-во МГУ, 1966. – 347 с.
7. Елисеев Н.А. Основы структурной петрологии. – Л.: Наука, 1967. – 256 с.
8. Клоос Э. Линейность// Вопросы структурной геологии. – М.: ИЛ, 1958. – С.5-96.
9. Апродов В.А. Геологическое картирование. – М.: Госгеолтехиздат, 1951. – 371 с.
10. Кратковский И.Л. Механизм образования вертикальных трещин в гранитных массивах// Геотехническая механика: Межвед. сб. науч.тр./Ин-т геотех. мех. НАН Украины. – Днепропетровск, 2001. – Вып.27. – С.169-174.
11. Петров В.П. Магма и генезис магматических горных пород. – М.: Недра, 1972. – 135 с.
12. Долгов Ю.А., Бакуменко И.Т., Томиленко А.А., Чуим В.П. Метаморфическое и магматическое минералообразование по данным термобарогеохимии// Геология и геофизика. – 1984. – № 12. – С.41-53.
13. Saaverda, J., Rossi de Tosseli, J., Tosseli, A., Garsia-Sanchez, A. The origin of the two-mica granites of the Loma Pelada Pluton, Tucuman, northwest Argentina// Lithos. – 1985. – Vol.18. – No.3. – P.179-185.
14. Конвективный тепло- и массоперенос. – М.: Энергия, 1980. – 46 с.
15. Елисеев Н.А. Основы структурной петрологии. – Л.: Наука, 1967. – 256 с.
16. Персиков Э.С. Вязкость магматических расплавов. – М.: Наука, 1964. – 160 с.
17. Tuttle, O.F., Bowen, N.L. Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. Mem. Geol. Soc. Am. 74, 1958. – pp.87-124.
18. Мюллер Р., Саксена С. Химическая петрология. – М.: Мир, 1980. – 516 с.
19. Зубов В.Г., Фирсова М.М. Об особенностях упругого поведения кварца в области $\alpha \leftrightarrow \beta$ перехода// Кристаллография. – 1962. – Т.7. – С.469-471.
20. Томашевская И.С. Исследование модуля сдвига и прочности образцов горных пород при высоких всесторонних давлениях методом кручения. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С.36-52.
21. Chayes, F. The finer-grained c. alkaline granites// Trans. N.Y. Acad.Sci. – 1950. – No.12. – P.144-151.
22. Brun, J.R., Pons, J. Strain patterns of pluton emplacement in a crust undergoing non-coaxial deformation. Sierra Morena, Southern Spain// J.Struct.Geol. – 1981. – Vol.3. – P.219-229.
23. Stone, D., Kamineni, D.S. Fractures and fracture intillings of Eye-Dashva Lakes Pluton. Atikokan, Ontario// Can. J. Earth.Sci. – 1981. – Vol.19. – No.4. – P.789-803.
24. Бердников Н.В., Томиленко А.А., Корсаков Л.П. Эволюция флюидного режима метаморфизма и ультраметаморфизма на востоке Букреинского массива// Докл. АН СССР. – Т.285. – № 2. – С.439-441.
25. Menhert, K.R., Busch, W. The Stage of migmatites formation// Neues.Jahrb.Mineral.Abh. – 1982. – vol.145. – No.3. – P.211-238.
26. Менерт К. Мигматиты и проблема происхождения гранитов. – М.: Мир, 1971. – С.154.
27. Kehah, C., Hollister, L.S. Anatexis in Central Gneiss Complex, British Columbia// Migmatites, Melt. and Metamorph. Procf. Geomech. Group. Miner. Soc. Glasgow. Apr. 1982. – Nauxwich. – 1983. – P.142-162.
28. Johannes Wilhelm. Beginning of melting in granite system Oz-Or-Ab-An-H₂O// Contrib. Miner. and Petrol. – 1984. – Vol.86. – No.3. – P.264-273.
29. McCutchen, W.R. Technical note some elements of theory for in-situ stress// Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. and Geomech. Abstr. – 1982. – Vol.19. – No.4. – P.264-273.
30. Справочник физических констант горных пород/ Под ред. С.Кларка мл. – М.: Мир, 1969. – 543 с.
31. Дэна Дж., Дэна Э.С., Фрондель К. Система минералогии. Минералы кремнезема. – М.: Мир, 1966. – Т.3. – 430 с.

32. Fernandez Angel. Signification des symetries de fabriques dans les roches magmatiques// C.r.Acad.Sci. – 1982. – No.16. – P.995-998.

33 McEwen, J., Hillary, E. Early fracture evolution within the Eye-Dashwa Lakes Pluton. Atikokan, Ontario, Canada// J. Struct. Geol. – 1958. – Vol.7. – No.5. – P.591-603.

34. Tarr R.S. The phenomenon of rifting in granite// Eng.Min.Journ. – 1891. – Vol.70. – P.161.

УДК 622.755+765.063

В.И. Кривошеков

ПЕРЕРАБОТКА УГОЛЬНОГО ШЛАМА: ГИДРОСЕПАРАЦИЯ И РАЗДЕЛЬНАЯ ФЛОТАЦИЯ

Наведені технічні особливості та технологічні переваги високоефективного гідросепаратора з перечищенням тонких шарів пульпи. Використання цих апаратів для класифікації вугільних шламів дозволяє отримати одностадійною сепарацією необхідну кількість кондиційних за якістю продуктів розділення, сприяє створенню малоопераційних водно-шламових схем, зниженню накопичення в них шламів та ліквідації скидання енергетичного шламу.

THE PROCESSING OF THE COAL SLIME: HYDROSEPARATION AND SEPARATE FLOTATION

The technical features and technological advantages of the high efficient hydroseparator with scavenging of lamellar pulp are presented. The using of such devices makes possible under one stage separation to obtain required number of separation products with high quality. Also it promotes to create a low-operation water-slurry, to reduce the accumulation of slimes, and to elimination of energetic slimes.

Одно из направлений улучшения качества товарных концентратов обогащения минерального сырья – повышение эффективности процесса гидравлической сепарации путем создания новых способов и аппаратов с рациональной зоной разделения и низкими удельными затратами энергии, поскольку применяемые для этого цилиндроконические гидроциклоны работают с невысокой (37...56% по Ханкоку) технологической эффективностью, обусловленной рядом причин. Отметим некоторые из них:

– повышение производительности за счет увеличения диаметра гидроциклона приводит к уменьшению фактора разделения и укрупнению граничного зерна сепарации;

– перемещение мелких (легких) минеральных частиц из конусной части гидроциклона происходит по сложным траекториям большой протяженности, не обеспечивающей достижения всех мелких частиц сливного патрубка;

– мелкие (легкие) частицы не могут преодолеть сопротивление плотного и вязкого пристенного слоя и транспортируются им, что повышает содержание их в песках;

– повышение объемной концентрации твердой фазы в конусной части гидроциклона способствует уменьшению различия скоростей мелких и крупных частиц в направлении к песковой насадке;

– перераспределение объемов песков и слива в гидроциклоне зависит от его разгрузочного отношения, определяемого поверхностью разделения, разграни-