

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ

№ 2138-В89

УДК 553.078.2

С.Н. Рычагов

БРЕКЧИЕВАЯ СТРУКТУРА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Петропавловск-Камчатский - 1989

Постановка проблемы

Брекчии традиционно являются объектом петрографических и металлогенических исследований. Однако, в последнее время понятие брекчии перерастает понятие конкретной породы или тела разрушения: брекчии начинают рассматриваться как элемент геологического пространства, имеющий исключительное значение для развития структурных связей на каждом структурном уровне - от минерального зерна до планеты. Данные естественных наук свидетельствуют о дискретности геоболочек Земли. Это и деление литосферы на систему геоблоков или обломков [32, 57], и "разделение оболочки земного шара на минералогические фракции" [1], и мелкая внутренняя неоднородность (зернистость) земной коры [42], а также дна океанов [35, 36] и мантии [47, 67]. Все тела вулканогенных рудных полей характеризуются крайней изменчивостью наблюдаемых параметров (формы, размеров, состава) и распадаются на отдельные размерами в 2-10 раз меньше "основного" тела [54]. Эта особенность типична и для вулканогенных рудных узлов, районов и провинций [12]. Структурно-вещественная неоднородность материала Земли имеет широкий диапазон размерностей [30]: от микроскопического (неоднородное строение отдельных микрокристаллов), через непрерывный ряд промежуточных порядков, до глобального (крупнейшие сегменты Земли, характеризующиеся специфическими чертами строения, состава и металлогенической специализации).

Брекчиево-блоковое строение Земли наглядно отображено на структурных схемах ранних этапов её геологической истории (рис.1). Во многом, по-видимому, такое строение является следствием формирования Земли из отдельных частиц (независимо от того, принимается "холодная" или "горячая" гипотезы образования), наиболее крупные из которых служили первичными неоднородностями. Так, в земной коре материков и дна океанов выявлены физические неоднородности размером в сотни и тысячи километров, развивающиеся с протерозойского до современного

периода и окаймленные наиболее подвижными и проницаемыми структурами. Авторы [37] предполагают, что древнейшие бассейны вулканогенно-осадочного накопления представляют собой "структуры первичной делимости литосферы". Согласно исследований В.В.Богацкого [9], характерными особенностями рудоносных структур являются дискретность, повторяемость, сгруппированность, затухаемость, единство и устойчивость рисунка.

Разделение геологической среды, следовательно, на объемные структурно-вещественные блоки-неоднородности воспринимается многими исследователями как факт. Однако, существующие представления о неоднородности геологического пространства не отвечают на многие теоретические и практические вопросы. Необходимы новые геологические модели объясняющие, в частности, образование относительно стабильных ("монолитных") и геодинамически подвижных (нарушенных, проницаемых) участков земной коры, а также первооснову неоднородности среды, механизмы её образования и причины устойчивости и преемственности от этапа к этапу и от одного структурного уровня к другому, соотношение неоднородности среды с рудообразованием.

Настоящая работа представляет собой попытку создать такую модель - брекчиевой структуры геологической среды. На основе анализа данных о физических основах брекчирования автор стремится показать всеобщность этого процесса, условия его реализации и значение для формирования месторождений полезных ископаемых.

Кратко о понятии "брекчия"

Общепринятое понятие брекчии - естественное образование, состоящее из угловатых обломков и цемента [43] - требует уточнения, поскольку оно до сих пор использовалось только на породном и минеральном уровнях изучения. Автор понимает термин брекчия, прежде

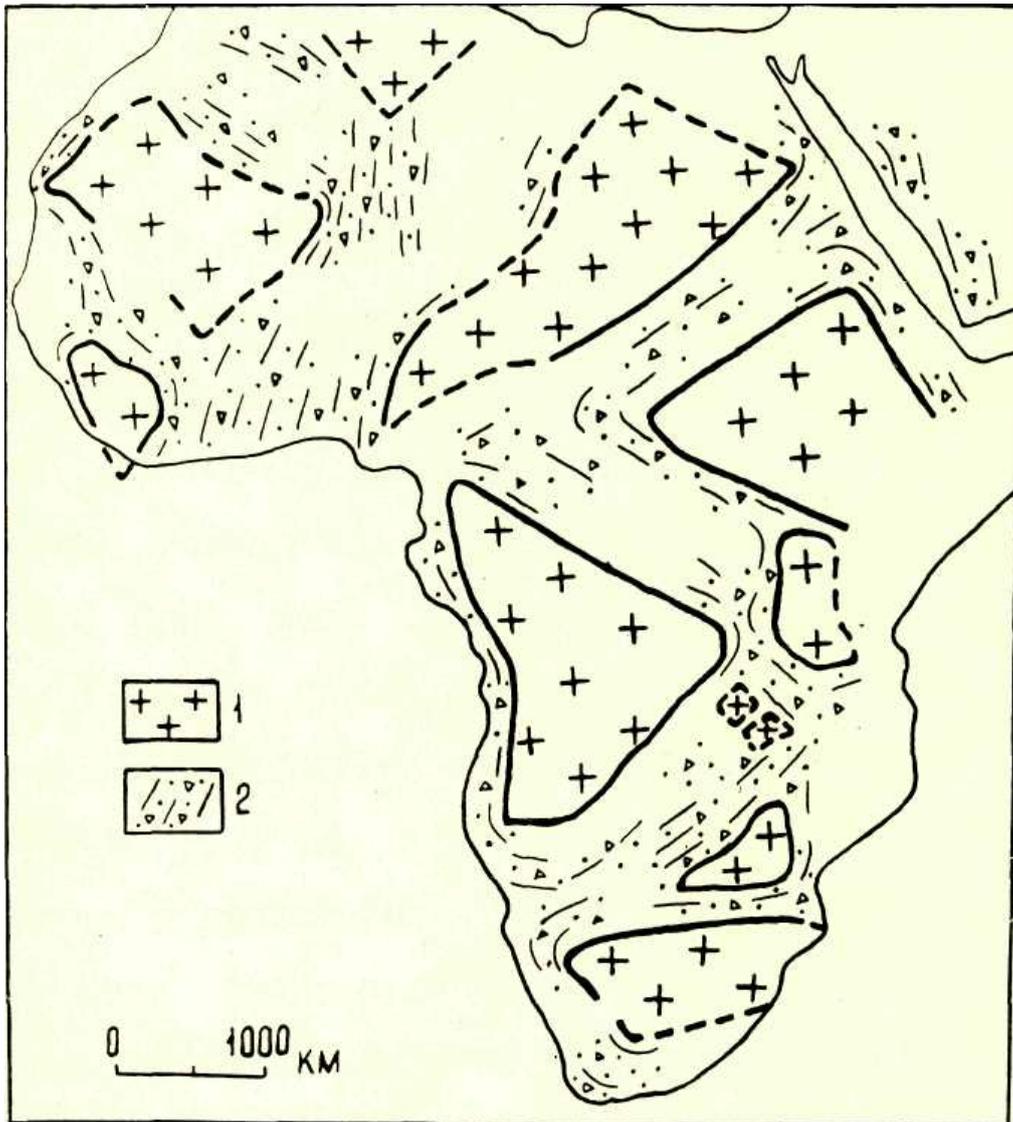


Рис. 1. Главнейшие структурные элементы Африки в раннем протерозое (по [58]).
1 - Древние платформы. 2 - Геосинклинальные складчатые пояса.

всего, как структурное состояние геологической среды, основу которой составляют два компонента (независимо от их размеров): наиболее стабильные, "монолитные" участки (обломки) и подвижные, активно реагирующие на все внешние воздействия элементы среды (цемент).

Обломки и цемент отличаются происхождением (источником), составом и основными физическими свойствами. Исключение составляют тектонические и некоторые другие брекчии, в которых цементом служат мелкие обломки тех же пород. Обломки чаще всего резко очерчены.

Однако, даже на породном к особенно региональном уровнях границы их могут быть затушеваны наложенными процессами. Но и в этом случае, во-первых, сохраняются и общая брекчиевая структура среды и ядра обломков, во-вторых, их очертания восстанавливаются с большой степенью вероятности.

Брекчии образуются как вследствие динамических, так и статических нагрузений. В первом случае образуются типичные брекчии, т.е. сложенные остроугольными обломками и цементом; во втором - границы между обломками и цементом "плавают" в некоторой зоне значений.

Неоднородное распределение напряжений –
основа брекчиевой структуры среды

Непосредственными измерениями показано широкое распространение высоких горизонтальных напряжений и на больших глубинах, и в непосредственной близости от земной поверхности. Высоконапряженные массивы имеют локальное распространение в пределах регионов, месторождений и отдельных тел. Участки высоких горизонтальных напряжений представлены наиболее прочными, упругими и монолитными породами. Исследования последних лет показали, что "в земной коре нет точек, которые находились бы в геологически неподвижном состоянии" [34]. Земная кора постоянно развивается, пульсирует ("пузырится", по Г.Л.Поспелову); происходит нарушение связности и уплотнение пород за счет периодических дифференцированных движений. Экспериментально подтверждается это положение для условий гористого рельефа: при поднятиях наблюдается значительное разуплотнение и увеличение объема пород. Высокие горизонтальные напряжения приурочены именно к зонам восходящих движений, независимо от тектонотипа региона, абсолютного возраста и происхождения пород. В вертикальном разрезе (до глубины $n \times 10$ км) установлен постепенный переход от анизотропного напряженного состояния вблизи поверхности, с резко выраженным превышением по величине горизонтальных напряжений над вертикальными, к изотропному

по мере увеличения глубины. Это означает, что при поднятии блоков вокруг них создаются условия для разгрузки энергии и, следовательно, происходит разрушение вмещающих пород и краевых частей блоков. Чем ближе к поверхности, тем интенсивнее разрушение. Этим, по-видимому, можно объяснить увеличение степени нарушенности пород по направлению к дневной поверхности, по крайней мере, в зонах устойчивых восходящих движений.

Отметим важнейшие особенности распределения напряжений в массиве горных пород. Напряжения распределены неравномерно и концентрируются в краевых частях целиков [44]. Следствием этого является толчкообразное изменение напряженного состояния и деформирование эндоконтактной зоны целика и вмещающих пород. Концентрация напряжений происходит вокруг трещин, пустот, поверхностей слоистости, кливажа. В относительно однородном массиве разрушения начинаются у таких "дефектных" структур, постепенно охватывая весь массив: зоны сдвижения, представляющие собой первичные и вторичные воронки обрушения, образуются в краевых частях залежей цепочками по простиранию [50].

Таким образом, согласно исследованиям в горном деле, в земной коре имеет место дискретное распространение локальных высоконапряженных, относительно монолитных массивов, между которыми расположены менее напряженные, нарушенные, породы. Напряжения концентрируются в эндоконтактной зоне массива, на краях обломков, включений, вокруг трещин. Обломки и все существующие "дефекты" среды являются концентраторами напряжений, которые в свою очередь определяют ход последующего структурообразования. Начальная брекчированность Земли, по-видимому, могла иметь решающее значение для перераспределения напряжений и развития деформаций на первых (всех?) этапах ее развития. Монолитные горные породы находятся в высоконапряженном состоянии. Для их деформации требуются усилия до $n \times 10$ раз больше, чем для трещиноватых вмещающих пород. Поэтому геологическая среда

разрушается сравнительно легко в условиях тектонически-активных, например, долгоживущих вулканогенных, структур.

Двухслойная модель - аналог модели слоистой

геологической среды

Двухслойной принята модель, в которой нижний слой является пластичным, а верхний - хрупким. В результате нагружения верхнего слоя он "оказывается расчлененным на многоугольные куски (отдельности)" [33]. По данным моделирования разрушения двухслойного блока пород, верхний слой вначале расчленяется на крупные отдельности, затем начинает разрушаться материал в пределах этих отдельностей, и т.д. С течением времени густота трещин постепенно возрастает. Материал модели распадается на все более мелкие отдельности и при каждом дополнительном нагружении. В двухслойных моделях, следовательно, постепенно разрушается верхний хрупкий слой. "Это свойство двухслойных моделей представляет особый интерес, поскольку и в породах земной коры происходит, по-видимому, аналогичное разрушение" [33, с.14]. Данный вывод действительно может иметь большое значение, т.к. на каждом уровне изучения вещества выделяется относительно хрупкий слой и подстилающий его пластичный. Для Земли в целом - это земная кора и мантия, для крупных регионов - участки коры над магматическим расплавом, для гидротермальных систем - водоупоры и водоносные горизонты, на породном и минеральном уровнях - новообразованный материал и материнское вещество (кристалл - расплав, кристалл - раствор). Если имеют место относительные перемещения породных масс, смещения блоков приводят к разогреву пород в зоне трущихся поверхностей и появлению расплавов. Формируются двухслойные геологические модели, в которых "образование и развитие разогретых зон разломов и слоев представляет собой самоподдерживающийся процесс, что обеспечивает их длительное и устойчивое существование во времени и пространстве" [31, с.6].

Рассмотрена реализация статических нагрузжений в двухслойных моделях. Но и динамические нагрузки, отождествляемые здесь с локальными, приводят к образованию двухслойных моделей - это должно быть типично для гидротермальных систем. При исследовании механизма перераспределения влаги в зоне действия взрыва в грунтах, в т.ч. скальных, методом нейтронного гамма-каротажа отмечено, что в течение десятков минут после взрыва в наиболее сжимаемой зоне и области, примыкающей к зоне остаточных деформаций, растет влажность [13]. В массиве пород изменяется поле напряжений и возникает гидравлический уклон, направленный к выработке, а также в сторону малых остаточных напряжений и к зоне уплотнения. Возникает дополнительный гидравлический уклон за счет собственного веса воды. Таким образом, при динамических воздействиях на среду происходит перераспределение влажности и возникновение локальных двухслойных моделей с реализацией напряжений в нагруженных хрупких слоях и, следовательно, делением среды на новые структурные неоднородности (рис. 2).

При метасоматозе на границах пород образуется трехслойная модель, а на поверхности - двухслойная, в которых самостоятельным телом является граничная фаза: тонкие пленки, межзерновые вещества, жидкости и газы, заполняющие капилляры и микротрещины. Поверхностная энергия распределена неравномерно, поэтому метасоматические процессы локализованы, что выражается в мозаичном (брекчиевидном) распределении продуктов метасоматоза.

Колебательный процесс - основа общих механизмов брекчирования

Волновая модель формирования ритмичных геологических структур предложена А.А. Апродовым [6]. Дальнейшему ее развитию способствовали многие исследования [8,9,39]. Волновыми процессами считаются периодические колебания, возникающие в недрах Земли под действием внешних (притяжение Солнца и Луны, изменение скорости

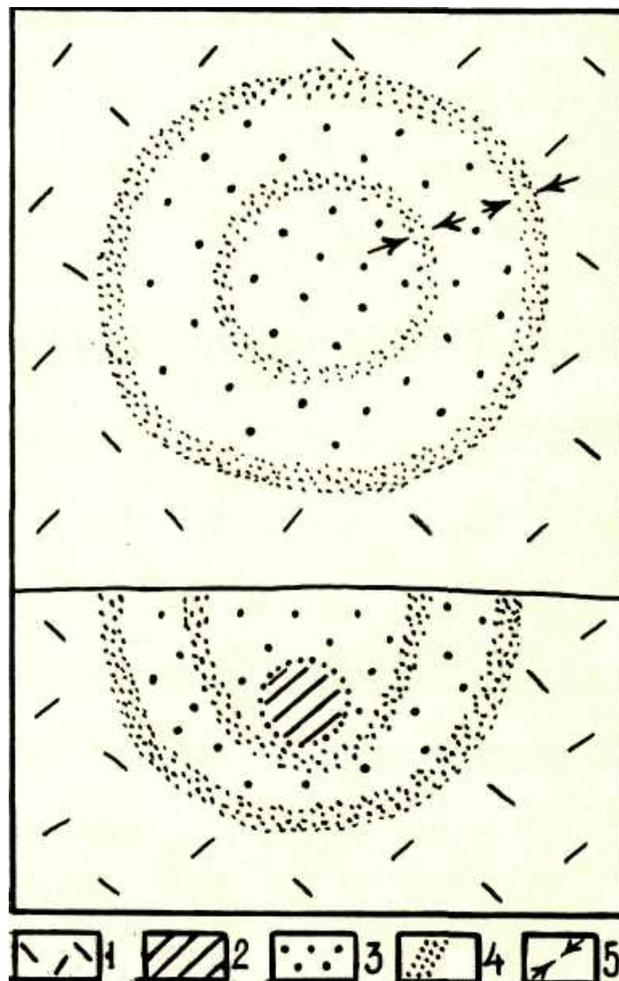


Рис. 2. Идеализированная схема перераспределения жидкости в породах в результате взрыва. План и разрез.

1 - Вмещающие породы. 2 - Зона смятия. 3 - Зона хрупких деформаций. 4 - Зона повышенной влажности. 5 - Направление движения жидкости, заключенной, как в порах, так и в трещинах вмещающих пород.

вращения Земли вокруг оси, вариации атмосферного давления, импактные события), а также внутренних источников. Колебания разных порядков установлены точными инструментальными измерениями. Для понимания роли волновых процессов в формировании брекчиевой структуры геологической среды обратимся к основам разрушения пород волнами напряжений.

Брекчирование среды волнами напряжений. Иерархия разрушения.

Максимальные разрушения в природных системах производят ударные волны. По классическому определению [25] ударная волна представляет собой область сжатия с резкими скачками давления, плотности и температуры на фронте волны. После отрыва ударной волны от источника взрыва между ним и фронтом волны образуется зона разрежения, в которой давление постепенно падает до атмосферного. По этой зоне от фронта ударной волны к источнику возмущения движется волна растяжения. На фронте ударной волны энергия рассеивается и механическая энергия превращается в тепловую. Это приводит к постепенному затуханию и переходу волны в звуковую. Разрушение породы ударной волной происходит путем последовательного отрыва слоев породы. Граница между нетронутой и разрушенной породой перемещается скачкообразно с некоторой средней скоростью [38]. Позади фронта волны разрушения также образуются ударные волны вследствие отражения первичной волны от различных препятствий и границ раздела. Эти волны во многих случаях догоняют начальную волну и усиливают суммарный эффект разрушения.

Считается, что разрушение тела происходит вследствие развития в нем некоторых поверхностей разрыва или смещения, которые начинаются с первичных трещин или дислокаций [17]. Породы разрушаются лавинообразно путем образования систем микротрещин и объединения их магистральным разрывом с нарушением перемычек между ними [62]. В системы структур разрушения объединяются не только начальные трещины, но и "магистральные разрывы", которые являются "микротрещинами" для своего структурного уровня. Количество охваченных разрушением структурных уровней определяется мощностью и временем существования источника энергии. Внешняя нагрузка при разрушении снимается с большой скоростью, т.к. скорость прорастания трещины в твердом теле равна скорости распространения звука в данном

теле [60]. Это означает, что формирование системы трещин каждого этапа разрушения (между периодами накопления упругой потенциальной энергии) в геологическом времени происходит практически мгновенно. Однако, поскольку для каждого структурного уровня существует целый ряд разновременных и различных по мощности источников энергии, вся система структур разрушения является результатом непрерывного последовательного процесса геологического развития.

Краеугольным положением модели лавинно-неустойчивого трещинообразования является повторяемость процесса разрушения на разных масштабных уровнях [59]. Более того, образование разрыва предопределяется подготовкой разрушения среды на предыдущем структурном уровне. Существующие в литосфере разрывы протяженностью от сантиметров до тысяч километров приводят к образованию "локальных полей напряжений с огромным диапазоном изменения размеров, т.е. к возникновению иерархии полей напряжений" [41], как отражения иерархии структур разрушения.

Рассмотрены условия разрушения пород при достижении критических нагрузок. Однако, элементы разрушения пород наблюдаются и при нагрузках значительно меньших критических. При нагрузке в 75-80% от разрушающей отмечается интенсивное развитие локальных микронарушений в узкой зоне будущего магистрального разрыва [14]. В некоторых случаях здесь же происходит перестройка структуры из хаотической в ориентированную из-за поворота кристаллов длинной стороной в одном направлении. В шлифах видна перекристаллизация в некоторых зернах роговой обманки, плагиоклаза; увеличивается число двойников, растет число ступенчатых трещин, появляются плоскости скольжения и подвижки по ним, прослойки перетертого материала. Следовательно, подготовка разрушения - длительный процесс, начинающийся уже при незначительных дифференциальных напряжениях. Пластические деформации и хрупкие разрушения происходят на локальных

участках без перестройки общего структурного плана при 25-30% от разрушающей нагрузки.

Отметим еще одну особенность волн напряжений, в частности, ударных. Ударный элемент, чаще всего - газ, входит в контакт со средой не одновременно по всей площади. Соответственно, возникают волны деформации с некоторым разрывом во времени. Волна деформации имеет участки нарастания и спада усилий, обладающие различной длительностью [3]. Образуются зоны интенсивного дробления пород, перемежающиеся с относительно монолитными пластинами. Такая последовательность зон дробления наблюдается в однородных породах. При наличии свободных поверхностей (тектонических, дневной) и границ раздела сред картина брекчированности усложняется за счет интерференции волн напряжений .

Интерференция волн напряжений

Существование двух или нескольких источников напряжений, а также отражение основной волны от поверхностей раздела сред или от свободной поверхности приводит к сложению либо взаимному уничтожению волн деформации - интерференции. На границе разнородных участков прямая волна распадается на две - обратную для первого участка и прямую для второго. Обратная волна будет растягивающей, производящей наибольшие разрушения, прямая - сжимающей. Чем контрастнее свойства сопряженных участков, тем существеннее преобразование волны на границе [3]. В массиве с несколькими границами раздела коэффициент использования энергии взрыва повышается, т.к. отраженные волны, интерферируя друг с другом, усиливают растягивающие напряжения [65]. Зоны интерференции трассируются участками наложения близких по размерам и времени образования двух или нескольких осесимметричных структурных неоднородностей. Это бисекторные зоны [12], имеющие в объеме форму линз или более сложную, в зависимости от числа структурных пересечений. Таким образом, зоны интерференции волн напряжений строго локализованы и выделяются высокой степенью нарушенности вмещающих

пород. Бисекторные зоны вулканогенных рудных полей контролируют наиболее продуктивные минеральные рудные ассоциации.

Разрушения волной растяжения

Прочность горных пород на отрыв намного меньше прочности на сдвиг, а "поскольку неоднородность пород приводит к образованию локальных участков относительного растяжения, вероятно, что микротрещины отрыва могут образовываться даже в условиях высокого гидростатического давления" [26]. Движущаяся волна сжатия от источника напряжения неоднородна вследствие неоднородности статического поля напряжений в массиве, а также наличия трещиноватости и границ раздела. На отдельных участках массива растягивающие напряжения концентрируются вследствие отражения волны сжатия от свободных поверхностей и сложения растягивающих волн с растягивающим хвостом волны сжатия [10]. Возвратное движение массива в сторону источника увеличивает амплитуду растягивающих волн. Разрушение, вызываемое растяжением, существенно усиливается за счет "множественного откола", возникающего в результате интерференции. Отражаясь от свободной поверхности, волна сжатия трансформируется в волну растяжения. Это свойство ударных волн используется в горном деле для усиления разрушения взрывом.

Таким образом, волна напряжений в геологической среде представлена волной сжатия, вызывающей минимальные разрушения и даже уплотняющей среду, и волной растяжения, производящей максимальные для каждого конкретного импульса разрушения. С этой позиции объясняется периодичность элементов геологической структуры (рис. 3). В телескопированных осесимметричных структурах концентрические зоны слабо трещиноватых пород чередуются с полосами, насыщенными разновременными магмо- и рудопроявлениями.

Сжимаемость пород: проблема пространства и брекчиеобразование

Исследования в области разрушения горных пород волнами

напряжений позволяют сделать определенные шаги в решении этой проблемы. По данным А.Н. Ханукаева [64] сжимаемость пород в зоне взрыва достигает 50-70%. Эти цифры соответствуют увеличению объема тел при брекчировании и реальны не только для близповерхностных условий (0-2 км), но и для глубин не менее 10 км, что и подтверждают данные бурения сверхглубоких скважин [28]. Существуют косвенные геологические свидетельства глубинного объемного разуплотнения и вследствие этого подъема блоков с сопутствующим дроблением пород в экзоконтактовых зонах [19]. Это так называемый тектоно-кессонный механизм брекчирования. К.Листер [68] пришел к выводу, что просачивание холодных поверхностных вод распространяется на глубину нескольких километров (не менее 7); в результате быстрого водяного охлаждения происходит растрескивание кристаллических массивов.

В зонах действия ударных волн происходит расслоение пространства на уплотненные и разуплотненные зоны, вплоть до образования расплавов с одной стороны и пустоты с другой. Уплотнение - разуплотнение вещества происходит как на участках локальных тектонических подвижек, так и в глубинных разломах.

Проблема пространства частично решается и при рассмотрении пульсации магматических очагов. Термическое сокращение объема магматических очагов достигает 10% и больше [40]. Образующиеся разуплотненные пространства достаточно велики при значительных размерах очага. Большая длительность и многократная повторяемость процесса сокращения-увеличения объема очага приводит к образованию мощных (до десятков километров) перемежающихся друг с другом зон тектонических и автоинтрузивных брекчий.

Проблема пространства находит логичное решение и для гидротермальных систем. Циркуляция гидротермальных растворов по проницаемым трещинным зонам, пропаривание пород с одновременной

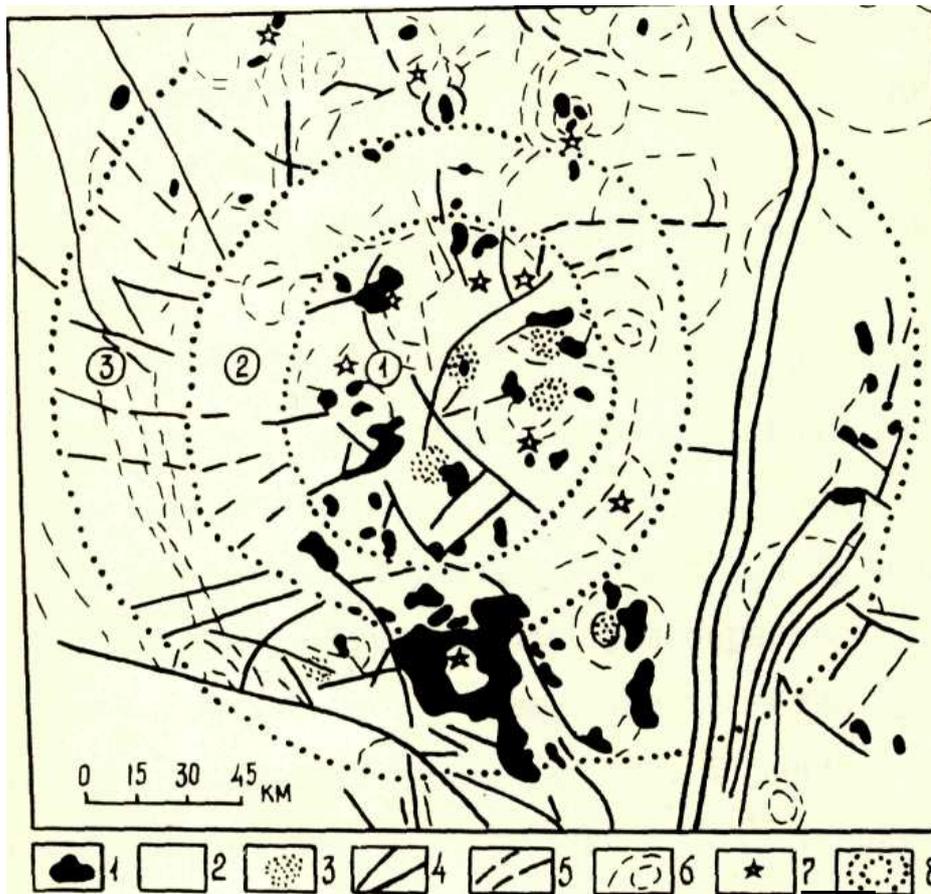


Рис. 3. Фрагмент геолого-геоморфологической структурной схемы Центрально-Камчатского района (по рис. 33 [54]).

1 - Интрузивные тела. 2 - Вулканогенные и терригенные отложения. 3 - Метасоматиты. 4 - Тектонические нарушения, установленные. 5 - То же, предполагаемые. 6 - Литологические границы. 7 - Вулканы. 8 - Структурные границы зон: 1 - смятия и интенсивного дробления, насыщенной эндогенными проявлениями; 2 - массивных пород с редкими разломами и единичными интрузивными телами; 3 - трещиноватых пород с высокой насыщенностью интрузивными телами.

фильтрацией через них растворов-рассолов приводят к интенсивным процессам вторичного минералообразования. При этом выщелачивание и механическое вымывание вещества при определенных условиях преобладает над привносом. В результате образуются высокопористые (до 70%) участки пород, чередующиеся с плотными (глинистыми) прослоями. Размеры образующихся пустот колеблются от долей миллиметра (выщелачивание или замещение минералов) до первых метров и более

(химическое и механическое выщелачивание крупных минеральных агрегатов, обломков первичных пород).

Разрушения при автоколебаниях

Под автоколебательной понимается система, в которой происходит преобразование энергии постоянного источника в энергию колебаний. Роль автоколебаний в развитии биологических, химических, физических, технических и геофизических систем чрезвычайно велика [27,66]. Геологическая среда в этом отношении не является исключением. Разрывными являются автоколебательные системы, очаговые зоны которых представлены тепловыми источниками - магматическими очагами, гидротермальными резервуарами, которые сами или их производные на другом структурном уровне служат накопителями энергии. Колебания будут разрывными, если в определенные моменты времени изменения параметров системы происходят скачкообразно. Картина разрушения весьма сложна при существовании в одной системе нескольких источников или нескольких накопителей энергии: для неоднородной геологической среды наиболее типичны сложные пересечения, наложения, сочленения зон брекчирования, выполненные брекчиевыми агрегатами.

Медленные волны, или изостатические колебания

Вертикальная расслоенность и латеральная неоднородность Земли, вариации рельефа и гравитационного поля вызывают движения масс в двух направлениях: по радиусу к центру Земли и от центра к поверхности. Этот тип колебаний определяется как изостатическое "всплывание-погружение", медленные волны. Относительно легкие массы выжимаются вмещающими породами на поверхность, богатые темноцветными породы постепенно опускаются, обособляясь в свой блок. Гравитационное колебание происходит и при осадконакоплении. Этот механизм имеет место на последовательных структурных уровнях: планетарном, региональном, породном. Не случайно на всех этих уровнях к положительной в рельефе

структуре примыкает отрицательная. Возможно, что пары структур возникают вследствие стремления породных масс к гравитационному равновесию.

Эти тривиальные для геологии представления подтверждаются исследованиями в области физики Земли. Оказалось, что существует "разновесное" (с неравными нулю смещениями) состояние литосферы, лежащей на несжимаемой жидкости (астеносфере), при котором архимедова сила, возникающая из-за инверсии плотности, компенсируется упругими силами [23]: выделяется определенной длины волна стационарного возмущения в системе литосфера - астеносфера, т.е. тектоническая волна малой частоты.

Тектонические волны с периодичностью в десятки, тысячи и миллионы лет возникают в твердых космических телах при взаимном притяжении тел. В литосфере Земли, лежащей на вязком основании (астеносфере) под действием сил притяжения Луны и Солнца возникает дискретно-волновое движение, вследствие которого точки литосферы испытывают разновременные деформации [22]. На фоне длительного разделения литосферы на отрицательные и положительные структуры происходит последовательное деление литосферы на относительно монолитные блоки и нарушенные участки.

Конвективная неустойчивость

Конвективная неустойчивость в жидкости или газе тлеет место в случае формирования в среде неустойчивой плотностной стратификации. Возникает систематическое перемещение более плотных объемов вещества вниз, а менее плотных - вверх. Натурные наблюдения в атмосфере и лабораторные опыты с жидкостями показывают, что конвекция при определенных условиях имеет черты, присущие разрывным колебаниям [66]: теплый и менее плотный объем жидкости (газа) как дискретный объект из нижнего слоя быстро перемещается вверх, происходит конвективный пробой. В результате жидкость перемешивается по вертикали.

Если прогрев нижнего слоя продолжается, то описанный цикл повторяется. Продолжительность цикла составляет от долей секунд до десятков минут. Аналогичные циклы имеют место в гидротермальных системах, однако их продолжительность здесь больше.

Изучение поглощения сейсмических волн в верхней мантии приводит к представлению о делении ее на области с высокими значениями механической добротности (хрупкий материал) и области с низкими значениями добротности. Последним соответствует разогретый материал, находящийся в состоянии пластического течения [24]. Результаты измерений хрупкости-пластичности материала верхней мантии в тектонически-активных зонах свидетельствует о том, что в этих зонах глубокий пластичный материал мантии распространяется наверх вследствие конвективной неустойчивости.

Конвекция имеет место и в гидротермальных системах, поскольку здесь есть и жидкая или газовой-жидкая среда (достаточно крупный геотермальный резервуар), и источник подогрева (остывающее магматическое тело). Конвекцией отчасти объясняется периодичность закрытых гидротермальных взрывов.

Таким образом, механизм конвективной неустойчивости может быть отнесен как к общим механизмам брекчирования среды (конвекция в мантии), так и к частным (циклическое перемешивание вещества в гидротермальных системах и магматических очагах).

Ударные явления как факторы эволюции Земли

Крупные ударные события на Земле приводят к заметным воздействиям на формирование геологических структур и региональную сейсмичность [20]. Такие события были особо эффективны на ранних этапах геологической истории Земли, т.к. в условиях отсутствия атмосферы приводили к интенсивному брекчированию верхнего слоя и инициированию тектонических процессов и вулканизма. Мощность оболочки, затрагиваемой ударным метаморфизмом, достигала многих

десятков километров.

Существующие данные свидетельствуют в пользу широкого распространения эндогенных брекчиевых тел в верхних оболочках Луны, Марса, Венеры [69]. Каковы причины широкого проявления эндогенных процессов на планетах земной группы, судить пока трудно. Одно можно утверждать: ударные события служат одним из основных источников энергии как для экзогенных, так и для эндогенных структурообразующих процессов, затрагивающих всю верхнюю оболочку планет. Возникающие тепловые аномалии являются источником структурообразования в течение геологически значимых отрезков времени.

Физические основы некоторых "частных" механизмов брекчирования

Горные удары

Горный удар представляется как хрупкое разрушение среды, происходящее вследствие упругого расширения предельно напряженного участка массива пород и возникновения колебательного процесса [44]. Колебания вызывают дополнительные разрушения в зоне удара. Ширина этой зоны составляет от 2 до 5 мощностей массива и достигает многих километров. При разработке полезных ископаемых фиксируются горные удары с радиусом разрушения до 6 км и сейсмической энергией до 10^6 джоулей [18]. Мощность образующихся брекчиевых структур составляет сотни метров и километры. На проявление горных ударов непосредственно влияют космические причины: обнаружена закономерная связь между приливными напряжениями и частотой горных ударов [7]. Таким образом, горные удары - это импульсные воздействия на среду волн напряжений, возникающих при переходе высоконапряженного массива через пороговое значение напряженности. Основное их отличие от других механизмов разрушения среды волнами напряжений - отсутствие теплового источника.

Автор ввел понятие газо-гидротермального удара, отличающегося от

понятия горного удара [55]: воздействие фронта движущегося с высокой скоростью газо-гидротермального потока на слабо проницаемые породы, часто выполняющие роль экранов. В результате происходит встряхивание пород практически без транс-спортировки образующихся обломков. Возможны только незначительные сдвиги и повороты. Типичные брекчии газо-гидротермального удара образуются в относительно хрупких массивах, экранирующихся пластичными породами, либо заключенных в них. Эти брекчии широко распространены в пределах современных и древних гидротермальных систем и рудоносны.

Разрушение в условиях метаморфизма

При достаточно высокой температуре следствием деформации может быть метаморфизм, сопровождающийся изменением минеральной ассоциации, привнесением или выносом материала из породы. Деформация рассматривается как фактор, который сопутствует метаморфизму любого типа и контролирует структуру породы [S3]. Деформация пород в условиях давления и температуры происходит в основном путем трансляционного скольжения и двойникования, а также диффузии и течения границ зерен. Диффузия приводит к изменению формы отдельных зерен или их агрегатов и одновременно вызывает зарождение центров кристаллизации. Миграция границ зерен ведет к росту зерен, либо растворению и изменению их формы. Скорость трансляционного скольжения, например, в чешуйках слюды или зернах карбоната контролируется скоростью деформации вмещающих пород.

Высокие температуры приводят к порообразованию, проскальзыванию по границам зерен и межзеренному разрушению, т.е. к микробрекчированию. Это подтверждают и исследования в области разрушения неорганических материалов [49]. В условиях теплового удара происходит интенсивное разрушение поверхности скальных пород, сопровождающееся вылетом зерен и развитием зоны деструкции на

глубину до 2-3 линейных размеров зерна [21]. В то же время разрушение пород значительно ускоряет протекание метаморфизма, в т.ч. гидротермального. При метасоматозе интенсивность привноса - выноса вещества, за счет небольшого объема и резких колебаний температуры и давления, выше, чем при региональном метаморфизме. Метасоматоз накладывается на все зоны преобразования пород: выветривание - диагенезис - метаморфизм - магматотипное замещение, охватывая температурный интервал 0-1000°C. Метасоматическое или физико-химическое брекчирование заключается в развитии блочных метасоматитов [46] и, как правило, предшествует процессам тектонического, интрузивного, эксплозивного брекчирования или сопровождает их.

Таким образом, как процессы метаморфизма подготавливают брекчирование среды, так и деформирование пород в условиях статического и динамического нагружения предопределяет развитие процессов регионального и гидротермального метаморфизма.

Взрывы в гидротермальных системах

Гидротермальные системы являются объектами геологической среды, локальные объемы которых могут испытывать резкие повышения и понижения давления. Действительно, резкие колебания давления происходят при взрывах, сейсмотектонических процессах. Резкое понижение давления приводит к быстрому расширению пузырьков воздуха в жидкости, жидкость вскипает. Если давление меняется на обратное, масса воды, двигаясь к центру пузырьков, увеличивает скорость движения, а у центра пузырька резко тормозится. Выделяется значительная энергия, происходит испарение части воды и кратковременное повышение температуры до 7000-10 000°C. Этой температуры достаточно для разрушения части электронных оболочек у молекул воды. Такое повышение температуры превосходит наблюдаемое при взрывах мощных взрывчатых веществ, хотя разогретый объем оказывается небольшим [45]. Это явление названо кавитацией. Резкое изменение напряжений в

ограниченном объеме создает условия для возникновения множества центров кавитации [48]. Кавитация, по-видимому, широко представлена в гидротермальных системах и приводит к перераспределению напряжений, микродроблению во множестве центров и локальному разогреву-плавлению пород.

Аналогичный механизм взрыва в условиях резко меняющейся геодинамической обстановки, вероятно, имеет место и в магматических очагах. Сжатие магматического очага вызовет разогрев расплава. Смена обстановки на обратную, а по данным наблюдений в сейсмически активных регионах смена движений по разломам может происходить до нескольких раз в 10 лет, приведет к резкому расширению объема очага и к повышению напряжений и возникновению ударных волн.

Локальные разогревы при трении и электромагнитные импульсы

Эмпирические данные свидетельствуют о широком проявлении в зонах тектонических нарушений зеркал скольжения, пленок и прослоев расплавленного материала. Это означает, что в зонах подвижек пород при трении достигаются высокие температуры. Разогревы пород наблюдаются и в том случае, когда трущиеся поверхности смочены жидкостью [4]. Этот факт имеет особое значение для объяснения гидротермальных взрывов в тектонически-активных системах: резкое повышение температуры пород при определенных давлениях вызывает вскипание раствора и дробление вмещающих пород.

Смещения пород сопровождаются трением, при котором возможна электризация поверхности диэлектрика (ими являются горные породы), накопление зарядов и возникновение электрических токов вдоль тектонических нарушений [16]. Электрические токи возникают также вследствие проплавления пород при трении и возрастании их проводимости [2]. Электрические разряды, в свою очередь, приводят к разогреву пород вплоть до расплава и могут явиться причиной землетрясения или взрыва. Разрушение пород даже при низких

температурах, например, температурах гидротермального минералообразования (200-400, до 600°C), сопровождается изменениями электропроводности, электромагнитным излучением, термотоками, термолюминесценцией и выделением запасенной энергии в виде тепла [15].

Горные породы в той или иной степени расчленены трещинами. Электрическая прочность породы, нарушенной трещинами, обычно ниже электрической прочности монолитного блока в 10 раз и более [5]. В экспериментах при подаче высокого напряжения на электроды и достижении критической величины напряженности происходит пробой трещины. Вследствие высокой проводимости канала пробоя напряжение на нем падает до нуля и происходит перераспределение напряжения в межэлектродном пространстве, вызывающее повышение напряженности электрического поля на непробитом участке. Следовательно, процесс может повториться на непробитом участке.

Таким образом, в тектонически нарушенной среде возникают электрические поля высокой напряженности, проводимость резко возрастает на 1-2 порядка в локальных нарушениях вследствие проплавления пород, что приводит к импульсным электромагнитным процессам. Сжатие пород и их деформация приводят к электризации частиц породы за счет самого процесса дробления и за счет образующихся частиц. Происходит перераспределение напряженности электрического поля и изменение прочностных свойств пород. Электрическую прочность пород снижают также увлажнение, физико-химические включения, неоднородность состава и пористость. Электрическое разрушение пород, как правило, сопровождается тепловым и химическим разрушением.

Явление контрэксплозии

Колебание давления в природных системах, как уже отмечалось, вызывает быстрые понижения и повышения давления в локальных объемах систем. Падение давления вплоть до атмосферного за доли секунд -

минуты и, возможно, большой отрезок времени вызывается, в частности, начальными эксплозивными выбросами. В результате происходит движение блоков вмещающих пород, в т.ч. и значительно крупнее $n \times 10$ м, в образовавшиеся разуплотненные зоны. Автор подробно останавливался на этом явлении [55], названном контрэсплозией [70].

Механизм контрэсплозии аналогичен протрузии - движению жестких блоков в относительно жесткой среде вверх, и гравитационному опусканию (кальдерообразованию) - движению блоков вниз. В основе этих механизмов лежит предварительное разрыхление среды и создание области пониженного давления.

На этом примере очевидна взаимосвязь целого ряда механизмов брекчирования: эксплозия - контрэсплозия - разогрев и проплавление пород за счет трения при движении блоков и связанные с этим взрывы - электризация пород и разрушение за счет электромагнитных импульсов - кавитация как микробрекчирование - тектонические подвижки (гидроразрыв). В недрах Земли к брекчированию приводят многие факторы: изменения давления, значительные прогревы и колебания температур, феномен тектонических нарушений как дренирующих систем и одновременно геологических тел, динамическое действие газов и флюидов - растворов, сложное влияние расплавов, метаморфизм. Важнейшим свойством брекчий каждого структурного уровня является их полигенность.

Брекчиевая структура вулканитов

(на примере рудных полей и вулканоплутонических комплексов)

Брекчии как элемент структуры вулканогенных рудных полей.

Срезы вулканогенных рудных полей характеризуются зональным распространением генетических типов брекчий [55]. Периферия полей отмечается широким площадным распространением тектонических гравитационных брекчий, локальных тел автомагматических и некоторых других (протрузивных, эксплозивных), в основном дорудных и

пострудных, брекчий. Средние концентрические зоны рудных полей выделяются площадным распространением брекчий газогидротермального удара (неперемещенных), локальными телами эксплозивных, реже - интрузивных, протрузивных, минерализационного выщелачивания и некоторых других типов брекчий, а также линейными (радиальными в вулканоструктуре) тектоническими зонами дробления и инъекционными туффизитовыми образованиями. Центральные части вулканогенных рудных полей представляют собой сложное брекчиевое сооружение: в основной массе повсеместно развитых брекчий газогидротермального удара, тех же, что в средней концентрической зоне, выделяются осесимметричные и линейные (дуговые, радиальные) тела брекчий гидротермально-инъекционного выщелачивания, метасоматических и полимиктовых комбинированных образований, наряду с единичными телами интрузивных, эксплозивных и некоторых других брекчий. В этой части рудного поля образуются, как правило, наиболее продуктивные, рудоконтролирующие когидротермальные брекчии.

Определить структурное положение брекчиевых тел стало возможно в связи с выделением и качественным и количественным анализом полей осесимметричных структурных неоднородностей [11,12,56]. Зональность распределения генетических типов брекчий согласуется с неоднородно-зональным строением поля осесимметричных структур разрушения. В центральной части поля концентрируется максимальное число локальных структур разрушения. Важнейшей особенностью рудоконтролирующих брекчий является приуроченность их к сложным структурным зонам - осевым частям телескопированных кольцевых структур, участкам наложения нескольких однопорядковых структур разрушения (бисекторным зонам), пересечениям линейных структур различных простираний, и т.д.

Таким образом, брекчиевые тела занимают определенное, а в случае рудоконтролирующих брекчий - особое, структурное положение в вулканогенном рудном поле. Более того, все поле вулканитов

представляется совокупностью пород различной степени брекчирования. Изучение системы брекчиевых тел в поле осесимметричных структур разрушения помогает решить многие геологические задачи [51,52,53] .

Брекчиевая структура пород, метасоматитов и руд как индикатор
геодинамики вулканоплутонического комплекса

В этом разделе остановимся на характерных особенностях структуры пород, метасоматитов и руд, иллюстрирующих некоторые положения работы.

Детальное петрографическое изучение пород вулканоплутонического комплекса Выченкия (рис. 4), Южная Камчатка, показало, что для субинтрузивных образований габбро-диоритов типична обломковидность основной микролитовой массы и фенокристаллов. Основная масса породы разбита на изометричные фрагменты-неоднородности, отличающиеся ориентировкой, а в некоторых случаях и размерами фенокристаллов. Границы фрагментов представлены тончайшими трещинками либо не выражены. Фрагментарность породы более характерна для краевых частей субинтрузивных тел. По-видимому, в расплаве образуются кристаллические зародыши-ядра, состоящие из нескольких зерен плагиоклаза, темноцветных и связующего стекловатого материала, которые, вероятно вследствие отличий отдельных частей магмы по газонасыщенности, вязкости, температуре расплава и другим параметрам, при ее движении поворачиваются друг относительно друга на некоторый угол. Такой разворот кристаллизующихся фрагментов движущейся интрузивной массой при соприкосновении ее с вмещающими породами происходит за счет трения прослоев расплава друг с другом и со стенками трещин. В приконтактных частях интрузивных тел возникают отмеченные выше тонкие трещинки между фрагментами диоритов. Для краевых частей интрузий типичны также "брекчии-брекчии", когда мелкие обломки фенокристаллов (0,1-2,0 мм) или раскристаллизованной основной массы заключены в округлые выделения (8-10 мм) с четкими границами, которые

в свою очередь сцементированы лавой андезитового состава либо сплавлены друг с другом.

Брекчиевидность основной массы пород отмечена также для даек мелкопорфировых андезитов, базальтовых потоков, кристаллокластических туфов, кварцевых прожилков. Участки-фрагменты даек андезитов выделяются группированием зерен плагиоклаза по определенным направлениям, размеры участков составляют 3-8 мм, на порядок выше размеров порфировых вкрапленников плагиоклаза. Плоскость шлифа из базальтовых потоков разбита на изометричные участки поперечником 4-6 мм, для каждого из которых характерна своя ориентировка плагиоклазов. Кристаллокласты плагиоклаза и кварца туфов (туфолав) среднего и кислого составов помещены в стекло ячеисто-обломковидной текстуры, подчеркиваемой скоплениями мелких кристаллов плагиоклаза, выщелаченными фрагментами стекла и кварц-хлорит-гидрослюдистыми новообразованиями в пустотах. Для прожилков кварц-адуляр-карбонатного состава характерны микробрекчиевые оторочки в эндоконтактах.

У контактов интрузивных тел, наряду с отмеченными явлениями, наблюдается повышенная, в сравнении с центральными частями, механическая коррозия порфировых вкрапленников темноцветных и плагиоклаза. Наиболее крупные зерна интенсивно трещиноваты, мозаичны за счет выкрашивания участков зерен и последующего гидротермального их изменения. Явление брекчирования фенокристаллов типично и для изверженных пород. В лавах андезитового, андезито-дацитового и дацитового составов Южно-Камчатского региона фенокристаллы плагиоклаза, кварца и пироксенов, ориентированные в направлении течения потоков, большей частью деформированы, сглажены на гранях. За счет разрушения краевых частей кристаллов в основной стекловатой массе пород отмечается до 15% мелких сколов плагиоклаза, пироксенов, кварца.

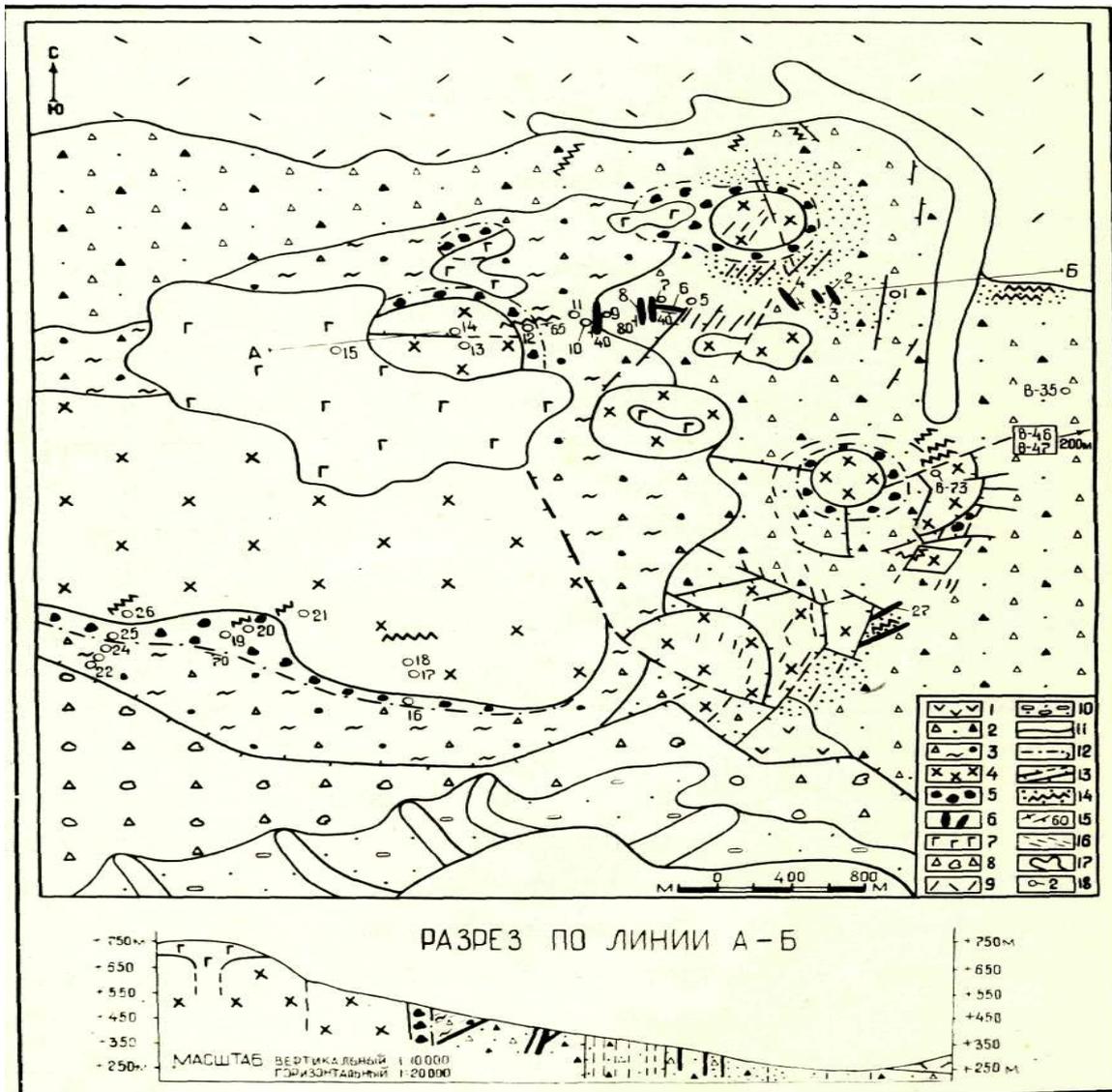


Рис. 4. Геологическая схема вулканоплутонического комплекса Выченкия. Используются некоторые материалы И.Ф.Делеменя, Ю.М.Стефанова.

1 - Андезитовые лавы основания вулканоплутонического комплекса палеоген-нижнемиоценового возраста (олигоцен?). 2 - туфы и туфолавы андезито-дацитового, до дацитового в верху разреза, состава. 3 - Толща переслаивающихся лав, туфолав, туфов кислого состава (кремнезема до 70%). В нижней части толщи на юге участка отмечены туфопесчаники, туфогравелиты, постепенно (?) переходящие в существенно вулканогенные породы (устное сообщение В.Л. Леонова). 4 - Интрузивные, субинтрузивные диориты. 5 - Интрузивные туфы: гиганто-, грубо-, мелкообломочные автомагматические брекчии с обломками, блоками вмещающих пород. 6 - Дайки андезитового, андезито-базальтового состава. 7 - Лаво-экструзивный комплекс андезитового состава заключительного (?) этапа магматизма. 8 - Туфо-конгломераты четвертичного возраста, фиксирующие заложение котловины Курильского озера. 9 - Пемзовые отложения голоценового возраста. 10 - Перемытые пемзовые отложения и озерные (озерно-морские?) пески верхнечетвертичного возраста. II - Стратиграфические и интрузивные границы. 12 - Внешние границы интрузивных туфов. 13 - Тектонические нарушения, установленные по геологическим данным. 14 - Поля гидротермально измененных пород и кварцево-рудные зоны. 15 - Элементы падения пород в плане. 16 - То же, в разрезе. 17 - Аллювиальные отложения широких участков речных долин. 18 - Точки опробования пород на абсолютный возраст и порядковые номера проб.

Это свидетельство того, что процесс разрушения фенокристаллов происходит близкоодновременно с их кристаллизацией.

Вторичное брекчирование фенокристаллов локализовано в зонах проявления тектонических, магматических и гидротермальных процессов и поэтому не имеет широкого распространения. Исключение составляет брекчирование пород в процессе гидротермального метаморфизма.

Автор остановился на микро- ("скрытом") брекчировании интрузивного и изверженного материала в эндоконтактных частях геологических тел. Экзоконтактная зона субинтрузивных тел идентифицируется по наличию здесь типичных автомагматических, а также гигантообломочных интрузивных брекчий (см. рис. 4). Автомагматические брекчии сложены округлыми либо неправильными обломками диоритов, сцементированных андезитовой лавой. Фрагментами обломки сплавлены друг с другом, цемент отсутствует. Вмещающих пород в обломочной части не более 5%, в краевых частях брекчиевых тел - до 50%; возникает оторочка (мантия) из обломков вмещающих пород и диоритов. Брекчии слагают воронко-, трубо-, жилообразные и неправильно-изометричные тела, локализованные в зоне гигантообломочных интрузивных брекчий. В гигантообломочных интрузивных брекчиях обломки представлены крупными (1-50 м) изометричными блоками диоритов, помещенных в тектоническую брекчию вмещающих пород с размером осколков от долей сантиметра до 20 x 60 м и более. В отдельных случаях цементом служат автомагматические брекчии. Блоки диоритов и вмещающих пород расположены беспорядочно, как обломки в гетерогенной брекчии или ксенотуфе.

Интрузивные гигантообломочные и автомагматические брекчии образуют своеобразную оторочку-зону мощностью от 50-100 до 400 м в экзоконтактных частях диоритовых тел. В отдельных случаях эта оторочка не установлена. По-видимому, ее образование связано с

корродирующим воздействием интрузивной массы на вмещающие породы при вскипании магмы. При этом возможно проявление ряда "частных" механизмов брекчирования (эксплозий, контрэксплозий, газовых ударов). Таким образом, брекчиевая структура типична для пород вулканоплутонического комплекса, а также для всей вулканогенной толщи (на рис. 5 показана принципиальная схема ее структуры). Она формируется в ходе вулканогенного и интрузивного процессов (начальная брекчированность как свойство потоков вещества) и в течение всего времени физико-химического изменения пород (наложенная брекчированность, локализуемая в тектонических, магматических и рудных зонах). Брекчии всегда, за редкими исключениями, полимиктовые: мелкие, чаще всего со сглаженными гранями или округлые обломки слагают крупные, для которых типичны остроугольные грани. Размеры крупных и мелких обломков отличаются в среднем в 3-6 раз. Минимальный размер обломков, установленный в прозрачных шлифах, равен 0,01-0,05 мм, максимальный (в обнажениях) достигает 50-60 м в одном измерении.

Важнейшей особенностью структуры вулканоплутонического комплекса является повышенная начальная брекчированность и проницаемость пород в контактовых зонах геологических тел (интрузий, даек, лавовых и туфовых потоков) и как следствие этого – локализация именно в контактовых зонах наложенных процессов, формирующих структуры вторичной брекчированности пород (тектонические, гидротермальные, в т.ч. рудные, выветривания). Контактные зоны, следовательно, имеют специфический состав, брекчиевую структуру, четкие интрузивные или тектонические границы, значительную мощность (десятки и сотни метров) и должны изучаться специально, в качестве "самостоятельных" геологических тел. Именно они идентифицируются в естественных физических полях как градиентные зоны, на космических и

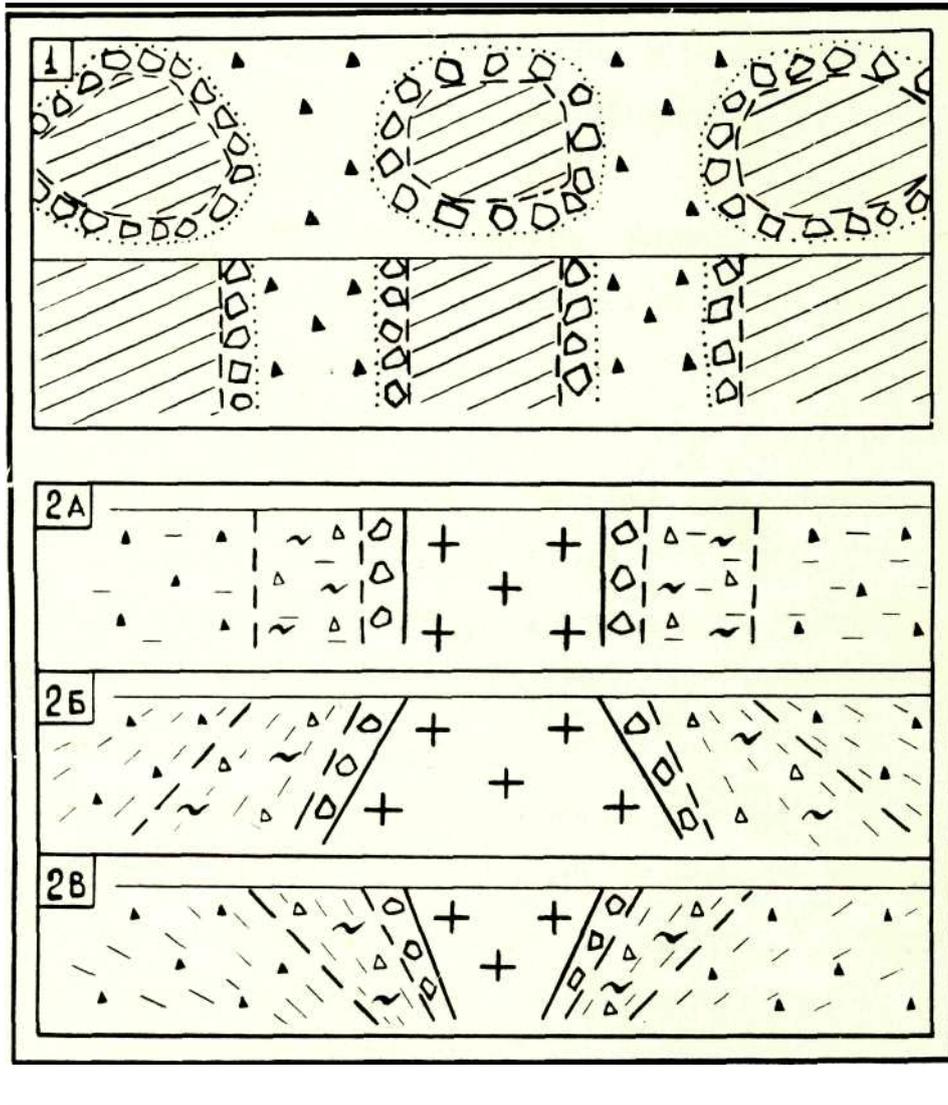


Рис. 5. 5-1 - Принципиальная брекчиевая структура вулканогенной толщи. Штриховкой показаны стабильные, относительно монолитные, участки (обломки); черным крапом - цемент. Обломки облекаются гигантскими брекчиями.

5-2 - Принципиальное строение вулканогенной толщи вблизи интрузивного тела диоритов. А - падение контактов тела вертикальное, Б, В - наклонное. Тело окружено оторочкой гигантских автомагматических (?) брекчий. Далее выделяется толща переслаивающихся туфов-туфолав-лав среднего и кислого составов и тоща туфов среднего состава псефитовой размерности, крупность обломков которых постепенно возрастает к интрузии.

аэрофотоснимках как линеаменты и узкие полосы в поле альбеда. Ранее многие геологи отмечали, что на контактах тел часто происходят тектонические и физико-химические, в т.ч. рудообразующие, процессы. Однако исследования автора показывают, что контактовые зоны имеют не частное, а принципиальное значение для понимания эволюции вулканоплутонического комплекса, текто- и рудогенеза.

Брекчиевая структура метасоматитов и рудная минерализация (на примере, вулканоплутонического комплекса Выченкия, Паужетской гидротермальной системы и рудных структур Корякии)

Геологическое картирование, петрографическое и минераграфическое изучение пропилитов, вторичных кварцитов и аргиллизитов современных и древних (до мел-палеогенового возраста) гидротермальных систем позволяет сделать некоторые обобщения по микроструктуре метасоматитов и рудных зон.

На рис. 6 приведена зарисовка типичного рудного жильного тела, состоящего из 4 зон, отличающихся строением и степенью (механизмами) брекчирования: от трещиноватых вмещающих пропилитов и вторичных кварцитов до полимиктового кварцево-рудного агрегата. Обычная мощность зон (Б, В, Г) составляет 0,5-2,0 м. Границы зон четкие интрузивные или тектонические, по ним нередки зонки-оторочки дробления, смятия, в отдельных случаях имеющие неотектоническую природу. Зона А представляет собой относительно мощную (5-10 м) оторочку жильного тела, состоящую из интенсивно трещиноватых вмещающих пород, дробленных на первом этапе формирования жильного тела. Трещинки залечены кварцем первой генерации. На втором этапе (зона Б) образовались брекчии газо-гидротермального удара. Обломки вторичного кварцита неперемещены, сцементированы кварцем второй генерации. Зона Б сложена взрывной и наложенной на нее близко-одновременной гидротермально-инъекционной брекчией. Последняя зона Г представляет собой центральную часть жильного тела, полимиктового рудного брекчия. Большая часть обломков здесь представлена кварцем нескольких генераций, в т.ч. продуктивным ритмично-полосчатым; осколки вторичных кварцитов редки. Гетерогенная рудная сыпь концентрируется в эндоконтактах обломков и фрагментов прожилков, крупные кристаллы сульфидов и самородных металлов относительно равномерно распределены внутри отдельных прожилков и сколков

кварца.

Настоящая зарисовка свидетельствует о том, что брекчие-вые структуры типичны для жильных рудных тел. В формировании жильных рудных тел выделяется несколько этапов брекчирования, каждый из которых приводит к образованию определенной зоны.

Гидротермальная рудная минерализация занимает определенное положение в структуре осесимметричных брекчиевых тел. Центральные части тел выделяются разнообразием рудных минералов и их ассоциаций, периферия тел - мономинеральными агрегатами и рассеянной сульфидной вкрапленностью. Самородные металлы, крупные зерна сульфидов и рудные линзы сложного минерального состава также тяготеют к центральным зонам брекчиевых тел. В разрезе брекчиевого тела состав рудной минерализации усложняется снизу вверх и от контактов внутрь тела: для нижних срезов более типичны мономинеральные рудные ассоциации. Вверх по разрезу брекчиевых тел происходит укрупнение зерен самородных металлов. Таким образом, изучение истории гидротермального рудного минералообразования и распределения рудной минерализации в объемной структуре полимиктовых брекчиевых тел имеет теоретическое и практическое поисковое значение, в частности, позволяет получить новую информацию к оценке абсолютных значений эрозионного среза вулканогенных полей.

Не характеризуя детально гидротермальное рудное брекчие-образование, это сделано в работах [46,54,55,29] и других авторов, остановимся на микробрекчировании как важнейшей составляющей этого процесса.

Гидротермально измененные породы вулканоплутонических комплексов обнаруживают следы повышенного брекчирования фенокристаллов и основной массы. Так, вкрапленники пироксенов и плагиоклазов связаны постепенными переходами с микролейстами и табличками этих минералов основной массы: от трещиноватой и смектитизированной эндоконтактной каймы во вкрапленниках до

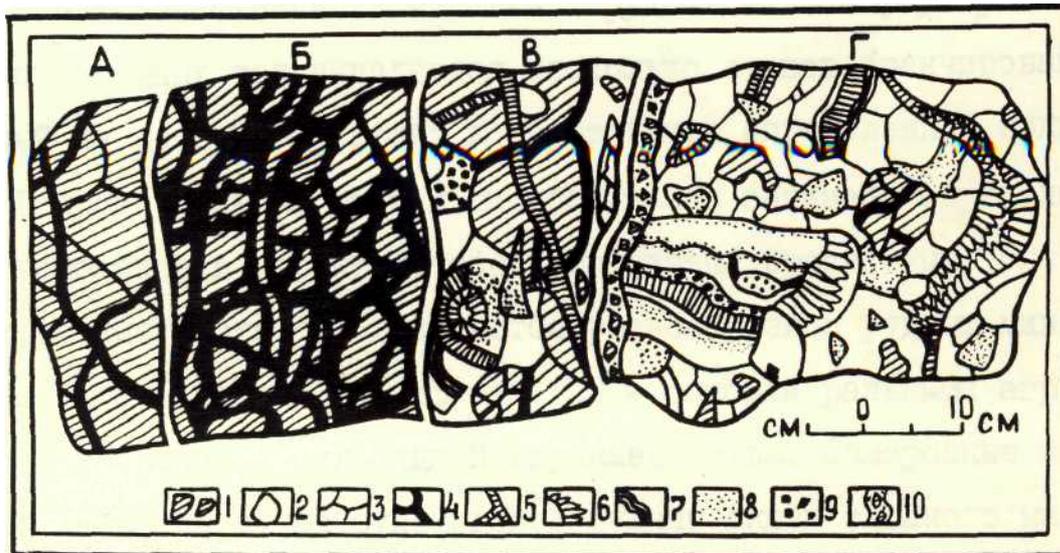


Рис. 6. Строение зонального полимиктового брекчиевого рудного тела одного рудопроявления Камчатки (зарисовка борта поисковой канавы).

А - Интенсивно трещиноватые пропилиты. Б - Мономиктовые неперемещенные брекчии (газо-гидротермального удара) вторичных кварцитов. В - Эксплозивные и гидротермально-инъекционные брекчии. Г - Полимиктовые рудные брекчии. Границы между брекчиями зон тектонические.

1 - Обломки пропилитов и вторичных кварцитов. 2 - Обломки кварца. 3-6 - Прожилки кварца, 3 - первой генерации, 4 -второй, 5 - третьей и четвертой, 6 - шестовато-призматический кварц последней генерации. 7 - Продуктивный ритмично-полосчатый кварц средних генераций. 8 - Мелкая гетерогенная рудная вкрапленность. 9 - Крупные выделения рудных минералов, 10 - Зонка тектонической брекчии.

лимонитизированных, гематитизированных и смектитизированных мелких чешуек пироксенов и табличек плагиоклаза основной массы, как бы оторванных от фенокристаллов (во многих случаях обнаружены следы "растаскивания"). Степень дробления зерен плагиоклаза и темноцветных возрастает от периферии вулканогенного поля к центру метасоматических полей. О предварительном либо близкоодновременном с метасоматозом дроблении пород свидетельствует тот факт, что в прожилках кварц-карбонатного, кварц-адулярового и цеолит-смектитового составов присутствуют в количестве до 10% от площади прожилков остроугольные сколки основной массы и фенокристаллов.

В слабо брекчированных породах отмечаются зонки дробления как тонкие пленки-оторочки вокруг зерен плагиоклаза и темноцветных. По этим зонкам развиваются вторичные минералы: кварц, кальцит,

глинистые, цеолиты. В метасоматитах начальных стадий изменения метасоматоз зарождается в зонах дробления вокруг фенокристаллов, а также обломков: появляется смектит в виде гонких прожилков и каемок. Ближе к центру метасоматического поля смектитизации подвержены и фенокристаллы, и обломки, и цемент. Мелкие обломки здесь, как правило, полностью замещены, у более крупных не подвержены изменениям центральные нетрещиноватые ядра.

Основная масса гидротермальных брекчий состоит из отдельных участков с мелко- и тонкообломочной структурой. Эти, обычно изометричной формы, участки ограничены одной или несколькими микротрещинками и, по-видимому, являются результатом микровзрывов, перераспределения и локализации внутренней энергии при формировании брекчиевого тела.

Обломки гидротермальных брекчий также трещиноваты, разбиты на 3-4 и более неправильно-изометричных остроугольных фрагмента, сдвинутых либо перемещенных друг относительно друга. Механическая работа по дроблению и перемещению обломков осуществляется за счет тепловой и механической энергии гидротермального флюида.

В брекчиях с кварцевым цементом вокруг крупных обломков вторичных кварцитов образуются оторочки криптокристаллического кварца, часто с тонкой рудной сыпью; оторочки у мелких обломков (на порядок меньших) отсутствуют. По-видимому, это объясняется тем, что в контактовых зонах крупных обломков, в сравнении с мелкими, концентрируется достаточно энергии для мобилизации силикатного и рудного вещества.

Интересны взаимоотношения обломков с цементом в кварцевых прожилках. Обломки вторичных кварцитов неравномерно выщерблены по всей поверхности и облекаются полосками гидротермального кварца. Иногда края обломков буквально растворены: переход от ядровой части обломка вторичного кварцита через окварцованную зону (с реликтами

первичной структуры) к мелкозернистому кварцу цемента постепенный. Кварц поздних генераций выполняет тонкие трещинки. Эндоконтакты прожилков выделяются четкой полосой, сложенной кристаллокластами кварца. О дроблении кварца и вмещающих пород в процессе формирования прожилков (за счет механической энергии внедряющегося флюида) свидетельствует следующее:

- 1) брекчиевые текстуры эндоконтактов прожилков;
- 2) следы механической коррозии стенок трещин;
- 3) большое количество (до 15%) мелких сколков вмещающих

пород в эндоконтактной полосе.

Относительно крупные кристаллы гидротермального кварца либо состоят из мелких обломков кварца (разбиты трещинками, фрагменты кристаллов смещены друг относительно друга), либо покрыты штриховкой из тончайших трещин. На изгибах или стыках крупных зерен часты выколы, изометричные участки трещиноватости с центральной зоной смятия (микровзрыв на границах зерен?). Такие участки классического строения микровзрывов с центральной зоной смятия, зоной интенсивного хрупкого разрушения и оперяющими трещинами (рис. 7-3) типичны для криптокристаллического кварца цемента гидротермальных брекчий. Участки микровзрывов выстраиваются в цепочки, линии, полосы, что указывает на кооперированное их происхождение.

Гидротермальная рудная минерализация приурочена к контактам обломков брекчий. Чаще всего происходит как бы налипание мелких рудных выделений на грани обломков. Это особенно характерно для мономиктовых брекчий, взрывных или газо-гидротермального удара (рис. 7-2). Происходит концентрация рудных зерен вблизи изгибов, изломов, углов обломков в межобломочных промежутках, на контактах или в пережимах обломков (рис. 7-1). Фрагментами зерна сульфидов образуют концентрические структуры (рис. 7-4), являющиеся структурами разрушения в гидротермальном кварце и выполненные

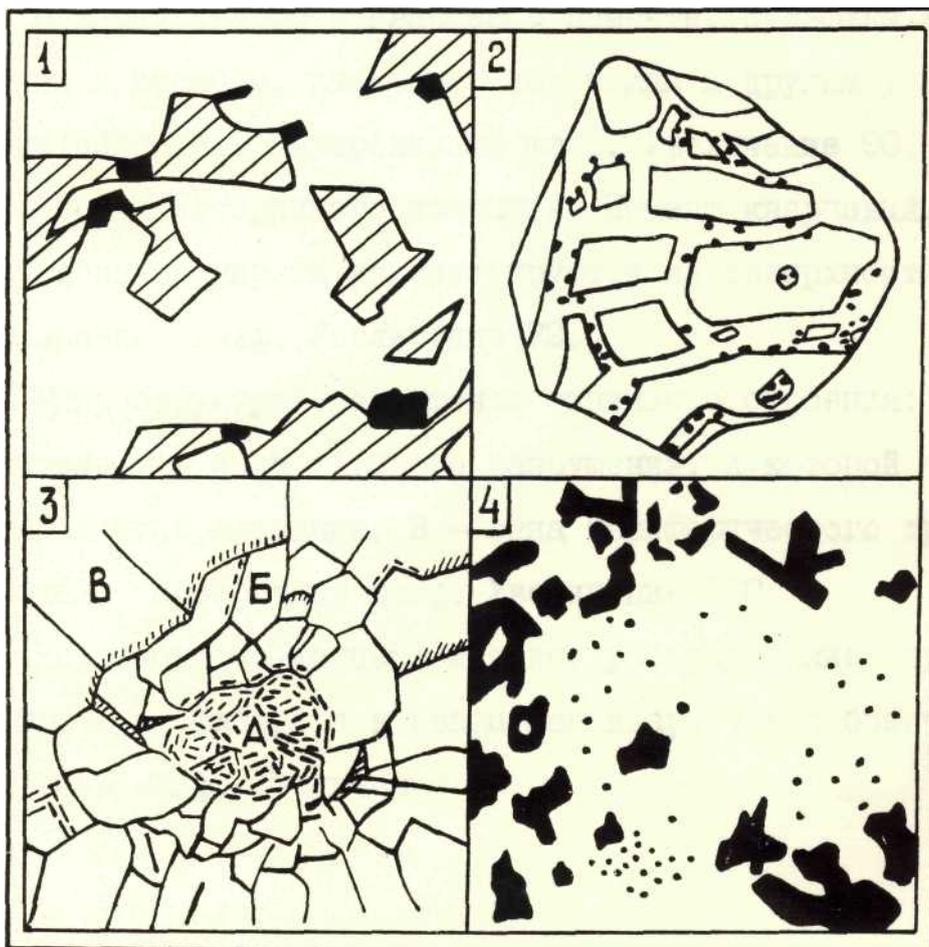


Рис. 7. Характер распределения рудных минералов в микро-брекчиях.

- 1- Обломки кварца в кварцевом цементе. Сульфиды железа приурочены к изгибам, выступам, пережимам и другим участкам кварцевых обломков. Полированный шлиф. Увеличение 90.
- 2- Брекчия вторичного кварцита. Цемент кварцевый. Точечные выделения пирита концентрируются на поверхности обломков. Прозрачный шлиф. Увеличение 72.
- 3- Микроструктура разрушения типичного строения: А - зона смятия, Б - зона хрупкого разрушения, к которой приурочена рудная минерализация, В - зона периферического трещинообразования. Прозрачный шлиф. Увеличение 160.
- 4- Неравномерно-концентрическое распределение пирита, арсенопирита и сфалерита в кварц-монокварцитовой брекчии. Полированный шлиф. Увеличение 90.

также кварц-адуляр-монтмориллонитовым агрегатом с отдельными чешуйками самородных металлов. Участки микробрекчирования фиксируются определенными рудными минералами и ассоциациями рудных минералов, что позволяет выделять стадии процесса разрушения породы на синрудном этапе.

Процессы рудообразования в контактовых зонах обломков и в цементе, а также само образование гидротермальных рудных брекчий можно наблюдать

на геотермальных полях Камчатки (рис. 8).

Таким образом, приведенные краткие данные по микроструктуре гидротермальных новообразований свидетельствуют о том, что для полей метасоматитов и жильного вещества типично микробрекчирование как свойство гидротермального рудного процесса. Метасоматоз препарирует зоны брекчирования, прежде всего контактовые, с одной стороны затушевывая первичную брекчиевую структуру пород за счет отложения вторичных минералов, с другой - подчеркивая первичную брекчиевую структуру вследствие выщелачивания и новообразования минералов на определенных участках (в контактовых зонах и в цементе). Приведенные данные свидетельствуют о том, что гидротермальное рудообразование является одним из процессов механического и физико-химического (метасоматического) брекчирования на породном и микроуровне.

Заключение: Модель брекчиевой структуры геологической среды

Автор не ставил целью выявить все механизмы, вызывающие брекчирование. Сделана попытка обосновать возможность брекчирования как дезинтеграции и одновременно консолидации среды на всех структурных уровнях. За дезинтеграцией вещества следуют, как правило, более продолжительные периоды преобразования: механического уплотнения и седиментации, магматической дифференциации и метаморфизма и другие, также идущие по пути выделения неоднородностей (оболочек, пластов, блоков, минеральных агрегатов, отдельных кристаллов). В эти же периоды происходят кратковременные импульсы - разрушения, влияющие на формирование структуры пространства. Каждая частица пространства испытывает различной степени статические нагрузки, приводящие не столько к разрушениям в физическом его понимании, сколько к различного рода организующим процессам, но процессам, делящим среду на обломки (блоки, ячейки, зерна). Происходит консолидация вещества за счет



Рис. 8. Фото фрагмента геотермального поля Камбального хребта (Ю.Камчатка), иллюстрирующее образование современной гидротермальной рудной брекчии. Отчетливы контуры обломков (вторичные кварциты и пропилиты). Цемент в основном состоит из монтмориллонита и сульфидов. Белые оторочки - норочки вокруг обломков представлены новообразованными силикатным и гидрокарбонатным материалом.

уплотнения и разуплотнения, разогрева пород и течения, кристаллизации и перекристаллизации. Следовательно, любой процесс структурообразования является процессом брекчирования среды, в предлагаемом автором широком понимании этого явления.

Брекчиевая структура геологической среды находит отражение в физических полях: гравитационном, магнитном, электрическом, тепловом. Брекчии представлены исключительно широко на каждом структурном уровне, что подтверждают, в частности, данные глубокого бурения [28]. По-видимому, следует ожидать высокую брекчированность пород и на глубине более 10-12 км. Брекчиевое строение земной коры до этой глубины в ниже иллюстрируется работами КМПВ и МОВ [61]. Выделяются участки, насыщенные преломляющими и отражающими короткими границами (открытыми

поверхностями - тектоническими нарушениями) и промежутки между этими участками, которые однозначно интерпретируются как слабо нарушенные блоки или обломки. В верхней мантии глубоководных желобов и впадин выделяются блоки с избыточной плотностью 0,1-0,2 г/см³ и, соответственно, зоны пониженной плотности, которые простираются до глубин 75-125 км [61]. Использование данных сейсмического профилирования в комплексе с другими геофизическими и геологическими материалами позволяет создать объемную брекчиевую модель земной коры.

Основой брекчиевой структуры среды является неоднородно-мозаичное распределение напряжений. Относительно монолитные массивы концентрируют напряжения, которые реализуются в эндо- и экзоконтактных зонах массивов (обломков) и в цементе. Не случайна поэтому устойчивая тенденция локализации проявлений эндогенной активности Центральной и Южной Камчатки (интрузивных тел, вулканических конусов, гидротермальных рудопроявлений и термальных источников) в цементе, экзо- и эндоконтактных частях обломков (рис. 9, 10, 11). Наиболее продуктивные минеральные рудные ассоциации на породном уровне, рудные тела на уровне рудного поля, рудные поля и узлы на региональном уровне контролируются структурами повышенной брекчированности - бисекторными зонами. Поле вулканитов представляется совокупностью пород различной степени брекчирования. Для вулканогенных и интрузивных пород, метасома-титов и гидротермальных рудных новообразований типично мик-робрекчирование как свойство тектономагматического и гидротермального процессов.

Таким образом, модель брекчиевой структуры геологической среды достаточно реальна, чтобы ответить на часть поставленных геологической теорией и практикой вопросов. Предлагаемая модель может служить новым инструментом картирования геологического

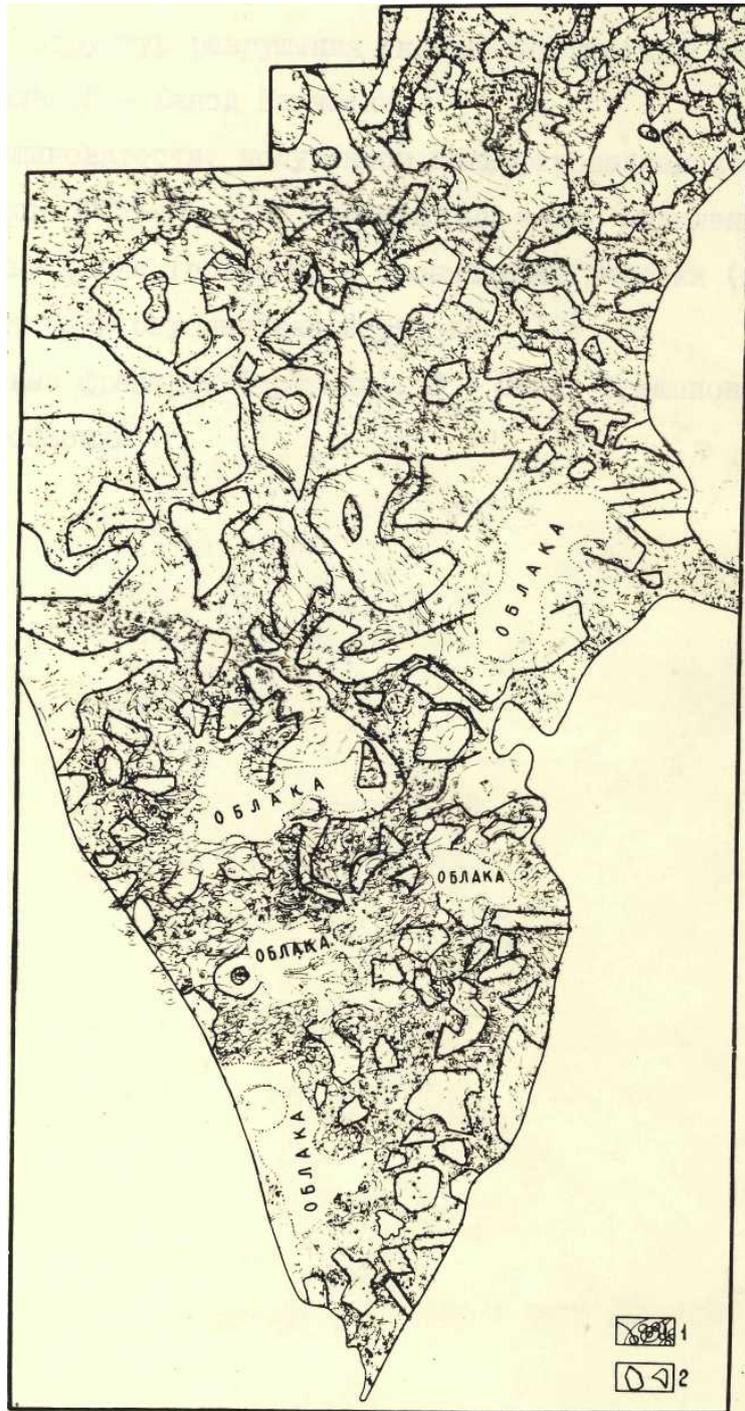


Рис. 9. Схематическая брекчиевая структура наблюдаемого поля кольцевых структур разрушения (кольцевых фрактур или трещин) Центральной - Южной Камчатки. В поле трещиноватости, полученном дешифрированием космических снимков EETS-1, по градиентным зонам выделены слабо нарушенные блоки (обломки) и проницаемые участки (цемент). Фрагмент поля опубликован в работе [12]. 1 - Кольцевые фрактуры (трещины). 2 - Слабо трещиноватые участки поля (обломки).

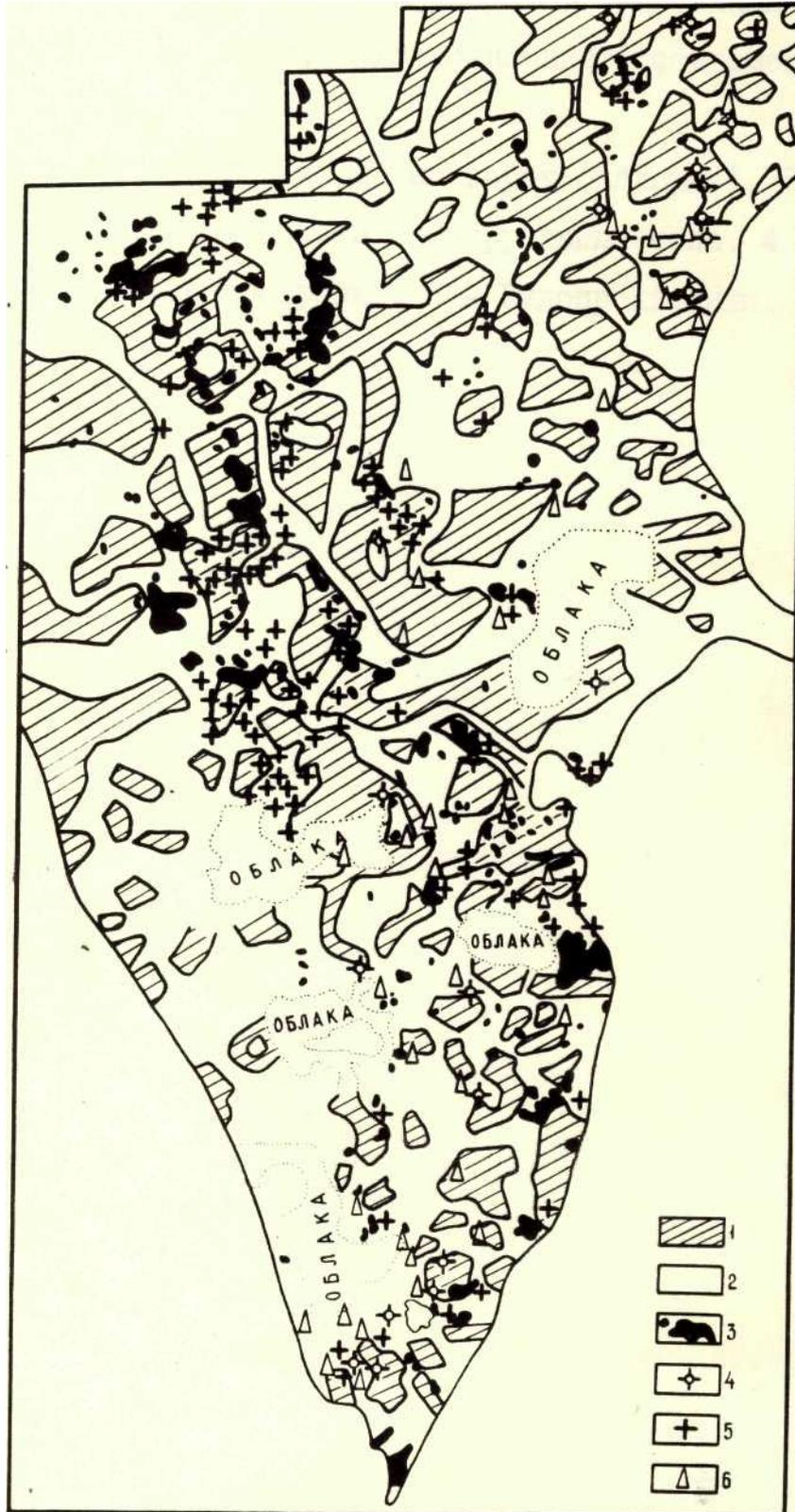


Рис. 10. Схематическая брекчиевая структура Центральной-Южной Камчатки и распределение продуктов эндогенной деятельности (интрузий, вулканов, рудопроявлений и современных гидротерм).

1 - Наиболее монокристаллические блоки пород (обломки). 2 - Трещиноватые участки (цемент). 3 – Интрузивные тела. 4 - Современные вулканические постройки. 5 – Рудопроявления. 6 - Термальные источники.

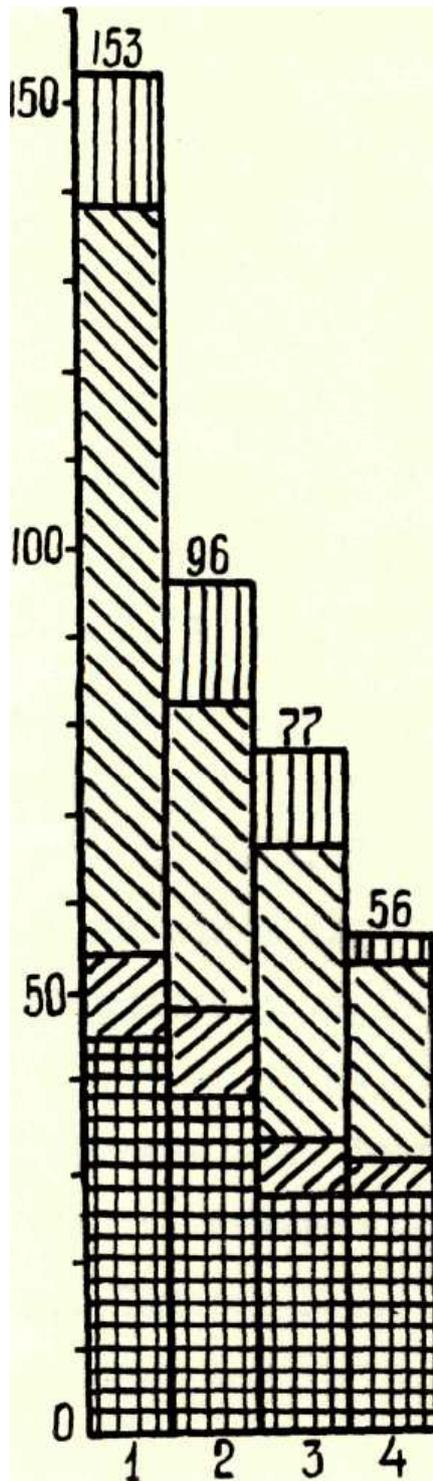


Рис. 11. График распределения продуктов эндогенной деятельности (разной штриховкой снизу вверх последовательно -интрузий, вулканов, рудопроявлений и термальных источников) в цементе (1), экзоконтактах (2), эндоконтактах (3) обломков и в обломках (4). По вертикали - частота встречаемости эндогенных проявлений в абсолютных значениях.

пространства.

Автор признателен всем специалистам, принявшим участие в обсуждении основных положений работы: В.И.Белоусову, И.Ф. Делеменю, Б.Ю. Забродину, В.Л. Леонову, Ю.Д. Матвиенко, Б.И.Самойленко, Ю.М. Стефанову, В.А. Широкову.

Литература

1. Авдулов М.В. К проблеме разделения оболочки земного шара на минералогические фракции // Вестн. Моск. ун-та. Сер.3. Физика. Астрономия. 1985. Т. 26. № I. С. 20-24.
2. Адамчук Ю.В., Трубников Б.А. Электропроводность лавы южного Ново-Толбачинского прорыва // Тр. Института атомной энергии им. И.В.Курчатова. М. 1977. 8 с.
3. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Ерельянц В.Э. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. М.: Наука, 1985. 358 с.
4. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. М. Государств. научно-технич. изд-во Оборонгиз, 1960. 595 с.
5. Андриенко Н.И., Захаров В.Н., Протасов Ю.И. и др. Механизм пробоя неоднородных моделей горных пород // Электротехнология разрушения горных пород. М. 1978. С. 61-66 (Тр.ГИГХСа, вып. 46).
6. Апродов А.А. Роль трещиноватости в поздние фазы формирования плутонов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1943. № 3. С. 67-81.
7. Артамасова Г.П. Влияние приливных напряжений на проявление горных ударов в шахтах Кизеловского каменноугольного бассейна. Л.: Труды ВНИМИ. 1970. Сб. 74. С. 405-410.

8. Белоусов В.В. Основы геотектоники. М.: Недра. 1975.
9. Богацкий В.В. Механизм формирования структур рудных полей. М.: Недра. 1986. 88 с.
10. Борисовец В.А., Козел А.М. Естественные и искусственные неоднородности реальных массивов горных пород // Горное давление и горные удары. Труды ВНИМИ. Л. 1974. Сб. 91.275с.
11. Василевский М.М. Основы прогнозной оценки рудоносных вулканогенных формаций // Прогнозная оценка рудоносности вулканогенных формаций. М.: Наука, 1977. С. 271-284.
12. Василевский М.М., Стефанов Ю.М., Рычагов С.Н., Некрасова Ж.А. Структурно-вещественные парагенезисы вулканогенных рудных районов, узлов и полей (к проблеме прогноза) // Вулканология и сейсмология. 1981. № 4. С. 60-73.
13. Вовк А.Д., Черный Г.М., Кравец В.Г. Действие взрыва грунтах. Киев: Наук. думка, 1974. 207 с.
14. Воларович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. Механика горных пород при высоких давлениях. М.: Наука, 1979. 152 с.
15. Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1980. 211 с.
16. Воробьев А.А. Физические условия залегания и свойства глубинного вещества. Высокие электрические поля в земных недрах. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1975. 297 с.
17. Галяс А.А. Методика аналитического определения поверхностей лунок выкола породы при сложных видах нагрузжений // Управление процессами разрушения горных пород. Сб. научн. трудов. Киев: Наук. думка, 1984. 152 с.
18. Геофизические исследования горных ударов. М.: Недра, 1975. 136 с.
19. Горяинов П.М. О геодинамических необычных обстановках осадочного породо- и рудо образования в связи с проявлением

тектонокекссонного эффекта // Литология и полезные ископаемые. 1983. № 5. С. 47-60.

20. Грив Р.А.Ф., Парментье Е.М. Ударные явления как факторы в эволюции Земли. "27 Междунар. геол. конгр., Москва, 4-14 авг. 1984. Докл. т. 19. Секц. С-19. Сравнит. планетол." М. 1984. С. 57-64.

21. Дмитриев А.П., Морозов В.Н. Механика поверхностного разрушения горных пород в температурных полях // Разрушение горных пород. I.: Записки ЛГИ. Т. 99. 1984. С. 3-15.

22. Добролюбов А.И. Волновое деформационное движение земной коры как тектонический фактор // Тектон. исследов. Запада Вост.-Европ. платформы. Минск. 1984. С. 174-188.

23. Дубровский В.А. Тектонические волны // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № I. С. 29-34.

24. Жадин В.В. Измерение добротности верхней мантии в Камчатской активной зоне // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. № 2. С. 22-29.

25. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.:Наука,1970.

26. Зубков С.И., Мячкин В.И. О длительной прочности горных масс очаговых зон землетрясения // Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975. С. 57-67.

27. Иваницкий Г.Р. Стратегия научного поиска // Природа. 1981. № 6. С. 2-14.

28. Казанский В.И. Глубинные корни рудных месторождений // Природа. 1986. № 11. С. 30-39.

29. Калинин А.И., Ольшевский В.М., Костырко Н.А., Болдырев М.Б. Инъекционные брекчии на близповерхностных месторождениях Северо-Востока СССР и их значение при локальном прогнозе // Тихоокеанская геология. 1986. № I. С. 71-82.

30. Козеренко В.Н., Ларцев В.С. Урало-Африканский и Восточно-Азиатский разломные пояса - границы крупнейших неоднородностей коры

и мантии // Разломы глубокого заложения. Геология и полезные ископаемые. М.: Изд-во Ун-та дружбы народов, 1984. С. 33-43.

31. Косыгин Ю.А., Маслов Л.А. Роль твердых лунных приливов в тектоническом процессе // Геотектоника. 1986. № 6. С.3-7.

32. Красный Л.И. Глобальная система геоблоков. М.: Недра, 1984. 224 с.

33. Кулюкин А.М., Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Особенности разрушения блока материала двухслойной модели // Математические и экспериментальные методы в дизъюнктивной тектонике. М.: Наука, 1986. С. 12-21.

34. Марков Г.А., Савченко С.Н. Напряженное состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа. Л.: Наука, 1984. 140 с.

35. Милашин А.П. Структурная неоднородность дна океанов и проблема их происхождения // Структурная неоднородность океанов. Владивосток. 1983. С. 3-8.

36. Михайлов О.В., Соловьев В.Н., Вольская В.А. Энергетические оценки вертикальных движений дна Тихого океана и различия в их интенсивности // Геоморфология. 1983. № 4. С. 53-61.

37. Моралев В.М., Глуховский М.Х. Кольцевые структуры ранних этапов геологической истории Земли в пределах древних щитов // Проблемы осадочной геологии докембрия. М. 1984. № 9. С. 98-102.

38. Никольский А.А. О волнах разрушения газированных пород // ДАН СССР. 1953. Т.ХСІ. № 5. С. 1035-1038.

39. Одесский И.А. Волновые движения земной коры. М.: Недра, 1972.

40. Осипов М.А. Формирование расслоенных плутонов с позиций термоусадки. М.: Наука, 1982. 100 с.

41. Осокина Д.Н. Иерархическая структура тектонического поля напряжений, выделение полей различных уровней и особенности взаимосвязи между ними // Математические и экспериментальные методы в

дизъюнктивной тектонике. М.: Наука, 1986. С. 47-59.

42. Павленкова Н.М. Глубинные неоднородности Земли // Природа. 1983. № 12. С. 36-47.

43. Петрографический словарь. М.: Недра, 1981. 496 с.

44. Петухов И.М. Основные результаты изучения горных ударов, разработки и внедрения мер борьбы с ними на шахтах СССР. Л.: Труды ВНИМИ, 1970. Сб. 74. С. 3-42.

45. Покровский Г.И. Физика взрыва. М.: Знание, 1954. 24с.

46. Пospelов Г.Л. Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск: Наука, 1973. 355 с.

47. Пущаровский Ю.М. Предстоит большая работа по геологии океанов // Природа. 1984. № 1. С. 21-22.

48. Разрушение. Т.1: Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. М.: Мир, 1973. 616 с.

49. Разрушение. Т.7, ч.1: Неорганические материалы (стекла, горные породы, композиты, керамика, лед). М.: Мир, 1976. 634 с.

50. Рогожина Ф.А. Формы сдвижения земной поверхности в зависимости от размеров залежей // Сдвижение горных пород. Л.: Тр. ВНИМИ, 1971. Сб. 83. С. 201-212.

51. Рычагов С.Н. Брекчии вулканогенных рудных полей - индикаторы термодинамических условия структуро- и рудообразования // Сводные палеовулканонологические карты СССР. Вулканизм и металлогения Средней Азии. Общие вопросы палеовулканизма. Тез. докл. VII Всесоюзного палеовулканонологического симпозиума. Ташкент: САИГИМС, 1986. С. 151-153.

52. Рычагов С.Н. Иерархия брекчиевых тел. - Там же. С. 254-255.

53. Рычагов С.Н. Иерархия брекчиевых тел и место среди них рудовмещающих // Вулканонологические исследования на Камчатке. Петропавловск-Камчатский. 1988. С. 38-42.

54. Рычагов С.Н. Кольцевые структурно-вещественные парагенезисы

вулканогенных рудных полей. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1984. 148 с.

55. Рычагов С.Н. Структурное положение и генетические типы брекчий вулканогенных рудных полей Корякского нагорья Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1982. № 2. С. 43-61.

56. Рычагов С.Н. Структурный контроль оруденения в Таловской купольно-кольцевой структуре Корякского нагорья (Камчатка) // Тихоокеанская геология. 1984. № 3. С. 74-81.

57. Садовский М.А., Голубева Т.В., Писаренко В.Ф., Шнирман М.Г. Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. № 2. С. 3-15.

58. Салоп Л.П. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра, 1982. 343 с.

59. Соболев Г.А., Рац М.В. О некоторых вопросах на стыке дизъюнктивной тектоники и сейсмологии // Математические и экспериментальные методы в дизъюнктивной тектонике. М.: Наука, 1986. С. 3-12.

60. Ставрогин А.Н., Бич Я.А. Хрупкое разрушение пород и горные удары. М.: Наука, 1973. 34-с.

61. Туезов И.К. Литосфера Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода. Новосибирск: Наука, 1975. 232 с.

62. Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975. 244 с.

63. Флинн Д. Деформация при метаморфизме // Природа метаморфизма. М.: Мир, 1967. С. 49-77.

64. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. М.: Недра, 1974. 224 с.

65. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. М.: Госгортехиздат, 1962. 200 с.

66. Чупрынин В.И. Разрывные автоколебания в геофизических системах. М.: Наука, 1985. 94 с.

67. Шило Н.А., Николаевский А.А. Плотностная характеристика верхней мантии территории СССР // ДАН СССР. 1983. 271. № 5. С. 1199-1202.

68. Lister C.R.B. On the penetration of water into hot rock // Geophysical Journal. 1974. T.39. № 3. P. 465-509.

69. Meissner R. The stage of plate tectonics in the evolution of terrestrial planets. "Lunar and Planet. Sci. 3: Astr. Pap, 13-th Lunar and Planet Sci. Conf., Houston, Tex., March 15-19, 1982. Pt. 2." Houston, Tex., s.a., P. 507-508.

70. Rust G.W. Preliminary notes on explosive volcanism in Southeastern Missouri // J.Geol. 1937. V. 45. P. 48-75.