

Таблица 4

**Химический состав и кристаллохимические формулы цирконов из гнейсов Уколовского участка (Микрозонд НІТАСНІ-80, Москва)**

Элемент	7541/5, зерно 1		7541/5, зерно 2		7541/3, зерно 3	
	Вес % элемента	Формула	Вес % элемента	Формула	Вес %оксида	Формула
Zr	51,52	1,157	53,48	1,194	66,06	1,06
Si	9,25	0,674	9,82	0,712	27,20	0,89
Al	1,42	0,108	0,85	0,064	Н.о.	Н.о.
Fe <sup>+2</sup>	1,19	0,044	0,51	0,018	Н.о.	Н.о.
Hf	0,00	0,00	0,00	0,000	3,38	0,06
Ca	1,11	0,057	0,13	0,006	Н.о.	Н.о.
Th	4,27	0,038	3,75	0,033	1,97	0,03
P	0,00	0,00	0,00	0,000		
Mg			0,03	0,003		
O	31,24	4,000	31,44	4,000		
Σ	100,00	2,077	100,00	2,030	98,61	2,04

**Зерно 1:** (Zr<sub>1,16</sub>, Th<sub>0,04</sub>, Ca<sub>0,06</sub>, Fe<sub>0,04</sub>)<sub>1,30</sub> [(Si<sub>0,67</sub> · Al<sub>0,11</sub>)<sub>0,78</sub> · O<sub>4</sub>]

**Зерно 2:** (Zr<sub>1,19</sub> · Th<sub>0,03</sub> · Ca<sub>0,01</sub> · Fe<sub>0,02</sub>)<sub>1,25</sub> [(Si<sub>0,71</sub> · Al<sub>0,06</sub>)<sub>0,77</sub> · O<sub>4</sub>]

**Зерно3:** (Zr<sub>1,06</sub> · Th<sub>0,03</sub> · Hf<sub>0,06</sub>)<sub>1,12</sub> [Si<sub>0,89</sub>O<sub>4</sub>]

цессы метаморфизма проходили при более низких температурах (650-5450С).

2. Первичная природа гнейсов по данным петрохимии и геохимии редкоземельных элементов определена как осадочная. Накопление граувакково-глинистых отложений происходило в бассейне континентального типа за счет сноса продуктов выветривания кристаллических пород различного состава.

3. Графитовые гнейсы являются закономерным парагенезисом первично осадочных глубоко метаморфизованных отложений. Поэтому предполагается первично биогенная природа графита Уколовского участка.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Лебедев И.П. К вопросу о геологической природе глубинных неоднородностей земной коры Воронежского кристаллического массива и истории их формирования в раннем докембрии // Вопросы теории и практики геологической интерпритации гравитационных, магнитных и электрических полей: Тр. междунар. конфер. - Воронеж, 1998. -С. 308-315.

2. Артеменко Г.В. Геохронология Среднеприднепровской, Приазовской и Курской гранит-зеленокаменных областей УЩ и ВКМ: Автореф. дисс. ... докт. геол.-минерал. наук. -Киев, 1998. – 39 с.  
 3. Кориковский С.П. Фации метаморфизма метапелитов. -М., 1979. -263 с.  
 4. Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. -М., 1976. –287 с.  
 5. Лебедев И.П. Реконструкция первичной природы и условий прогрессивного регионального метаморфизма раннепротерозойских образований воронцовской серии (юго-восток Воронежского кристаллического массива): Автореф дисс. .... канд. геол.- минерал. наук. - Воронеж, 1977. -21 с.  
 6. Сиротин В.И., Лебедев И.П. О литогенезе в ранней истории Земли (по данным сравнительной планетологии и раннего архея Воронежского кристаллического массива) // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. -2001. -№ 12. -С.19-37.  
 7. Конди К. Архейские зеленокаменные пояса. – М., 1983. – 390 с.  
 8. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. - М., 1976. -267 с.

УДК (552.3:553.3.068.7).001

**МИНЕРАЛЬНЫЕ ФАЗЫ ДИСЛОКАЦИОННОГО МЕТАМОРФИЗМА**

**В.В.Соболев, В.М.Кравченко, О.В.Орлинская**

*Национальная горная академия Украины, г.Днепропетровск*

Дислокационный метаморфизм – широко распространенное, но не общепризнанное понятие. Его обособление в самостоятельный геолого-генетический тип метаморфизма обосновывается подтвержденными экспериментально новообразованиями графита, алмаза и метана в карбонатных породах и углях под воздействием стресса и термоэлектрических полей в зонах глубинных разломов.

Дислокационный метаморфизм (ДМ) – распространенное, но все еще нечетко определившееся и потому дискуссионное понятие. К.Р.Анхайсер, Я.Н.Белевцев, В.А.Буряк, П.Ф.Иванкин, Г.А.Кейль-

ман, Ф.А.Летников, и особенно В.И.Казанский обосновывают правомерность обособления ДМ в самостоятельный генетический тип его приуроченностью к зонам долгоживущих глубинных разломов,

которые отличаются особым геодинамическим и термодинамическим режимами метаморфизма – частой сменой растяжения сжатием, интенсивным воздействием стресса, многократно превышающего по величине литостатическую нагрузку; значительным влиянием теплоты, выделяющейся при трении перемещающихся блоков пород.

По нашему мнению, принципиально важным отличием ДМ от других типов метаморфизма является влияние практически неучтенного преобразующего фактора – электромагнитных полей. Их формирование в зонах глубинных разломов может быть связано, например, с такими экспериментально установленными физическими эффектами, как свойство свежееобразованных поверхностей твердых тел испускать в вакууме электроны высоких энергий, появление электрических импульсов при динамическом воздействии на горную породу, содержащую минералы-пьезоэлектрики [1].

Физико-математическое моделирование, проведенное авторами, позволило доказать, что при динамических нагрузках свыше  $5 \cdot 10^8$  Па за счет развития пьезоэффекта в кварцсодержащих породах на гранях одного зерна кварца (в зависимости от его размера) может возникать разность потенциалов 0,26 - 26 кВ. При этом пьезоэлектрический эффект интегрален, а следовательно уровень его в горном массиве определяется количеством и размером зерен кварца или иных минералов-пьезоэлектриков. Учитывая это, можно допустить принципиальную возможность формирования электромагнитных полей в горных массивах только за счет пьезоэффекта.

Совокупность названных факторов вызывает появление типоморфных минералов и объясняет главные геологические особенности зон глубинных разломов: чешуйчато-блоковое строение, обилие мощных тектонических швов с продуктами катакластического метаморфизма, неоднородность метаморфических фаций, проявления полиметаморфизма и диафтореза. В итоге, по В.И.Казанскому [2] ДМ – мощный преобразующий процесс зон глубинных разломов, для которого характерно многообразное сочетание деформационно-тектонических преобразований пород с обязательным появлением новообразованных минеральных фаз.

Попутно отметим неудачное с этимологической точки зрения отождествление терминов “дислокационный” и “динамометаморфизм”. В самом деле “динамометаморфизм” (от *dynamis* – сила) означает только воздействие давления, которое сопутствует любым типам метаморфизма. Напротив “дислокационный” (от *dislocation* – смещение, перемещение) предполагает непереносное нарушение залегания и разрушение сплошности пород и потому термин “дислокационный” предпочтительнее.

В принятом определении ДМ является самостоятельным генератором дегидратационных гидротермальных растворов. Однако он редко проявляется независимо от других эндогенных процессов. Этому препятствует многократная тектоническая

активизация глубинных разломов, которая обычно сопровождается интрузивной магматической деятельностью и сопутствующим поступлением постмагматических и мантийных флюидов и гидротерм. В результате в зонах глубинных разломов формируется полигенетический комплекс пространственно совмещенных минеральных ассоциаций, который маскирует минеральные новообразования, обязанные своим появлением ДМ. Поэтому одним из решающих доводов существования ДМ является отыскание минеральных новообразований дислокационно-метаморфического происхождения. Примеры таких новообразований немногочисленны, но принципиально важны в генетическом отношении.

Непеременным спутником минеральных ассоциаций в зонах ДМ является общеизвестная группа стресс-минералов: дистен, ставролит, андалузит, слюды, хлорит, хлоритоид, антофиллит. Однако, являясь индикаторами стресса, эти минералы не относятся к типоморфным образованиям ДМ, поскольку они характерны для динамотермального и других генетических типов метаморфизма, где эпизодически проявляется стресс. Наоборот, к числу типоморфных образований ДМ можно отнести тонкозернистые агрегаты серицита, хлорита и талька, которые возникают в филлонитах (филлонитовых милонитах) при катакластическом метаморфизме магматических и метаморфических пород [3]. Дополним этот частный случай более характерными примерами неоминерализации, которые подтверждены экспериментально.

Многие исследователи обращают внимание на присутствие в глубинных разломах явно эпигенетических форм выделения графита и шунгита [4]. Их появление обычно объясняется отложением из мантийных флюидов. В породах, содержащих расчлененные формы свободного углерода (черносланцевые формации), допускается переотложение таких форм с повышением концентрации среди различных тектонитов. Наряду с этим практически не обсуждается возможность возникновения графита и других форм углерода за счет минералов, подвергающихся воздействию ДМ.

Для оценки возникновения графита в геологических условиях ДМ, в т. ч. при воздействии неучитываемых обычно электрических полей, нами предпринята серия экспериментов по преобразованию высокожелезистых карбонатов (сидероплезит) под влиянием термоэлектрических полей без сопутствующего воздействия гидротерм [1]. В качестве экспериментального материала использованы образцы сидеритолитов гидротермально-метасоматического и первично-осадочного происхождения из Белозерской зеленокаменной структуры Украинского щита (УЩ).

Условия и процесс экспериментов подробно изложены в [1]. Нагревание образцов карбоната осуществлялось в воздушной среде до  $1050^\circ\text{K}$  ( $772^\circ\text{C}$ ), что соответствует амфиболитовой фации, при непрерывном воздействии постоянного элект-

трического тока с  $E \geq 300$  В/см. Принятый уровень напряженности электрического поля определен с помощью физико-химического моделирования. В процессе нагревания сидерита в этих условиях установлено явление скачкообразного увеличения электропроводности образцов. Предполагалось, что скачок электропроводности обусловлен сменой ионной проводимости преимущественно на электронную. Новой фазой, образованной в результате физико-химических превращений и обладающей электронной проводимостью, мог быть только графит. И, действительно, с помощью оптического микроскопа, рентгеноструктурного и химического анализов, в конечных продуктах преобразования сидерита, среди основной массы оксидов железа (дисперсный гематит) обнаружено присутствие небольшого количества мелкодисперсного графита.

Возникновение графита в процессе диссоциации сидерита объяснено следующим образом. Очевидно, что перенос электрического заряда осуществляется в основном по границам зерен карбоната, т.е. по переходной зоне между поверхностями его контактирующих зерен. Электрическое поле (при всех прочих неизменных параметрах) является параметром, нарушающим равновесие в системе поверхностных атомов. В этих условиях система стремится к такому состоянию, когда эффект внешнего возмущающего действия поля ослабевает. С одной стороны температура способствует термическому разложению исходной минеральной фазы (сидерита) и увеличению числа таких подвижных компонентов в системе как оксиды углерода, а с другой – электрическое поле стимулирует образование электропроводящих фаз, стремясь при этом сформировать кратчайший путь с минимальным электрическим сопротивлением.

В исследованных образцах сидерита межзерновое пространство, ограниченное заряженными поверхностями, характеризуется с ростом температуры увеличением концентрации оксидов углерода. При неизменной величине напряженности внешнего электрического поля за счет образующихся ионов в результате диссоциации сидерита растет плотность поверхностных зарядов. При достижении некоторых значений температур в межзерновом пространстве резко возрастает концентрация атомов углерода в результате диссоциации оксидов в поле зарядов [5], т.е. достигаются высокие степени пересыщения. Скачкообразное возникновение новой фазы (графита), происходящее в микроскопических областях всего объема межзернового пространства, вызывает скачкообразную смену типа проводимости образца сидеритолита.

В соответствии с теорией образования зародышей [6], возникновение новой фазы обусловлено флуктуациями плотности и энергии. Представление о непрерывности при переходах из газовой фазы в кристаллическую в этом случае неприменимо, поскольку непрерывный переход характерен для случая превращения одной кристаллической решетки в

другую. Превращение “углеродный газ → кристаллический углерод” относится к кинетическим процессам, т.е. удаленным от равновесия. Для образующейся новой фазы характерно то, что размеры кристаллитов весьма чувствительно зависят от параметров процесса, что она может быть аморфной или микрокристаллической и, наконец, то, что образующиеся структуры являются склонными к релаксации при последующих обработках.

Охарактеризованный эксперимент подтверждает допущение о возникновении эпигенетических форм графита за счет местного источника (диссоциация карбоната), но при непременном участии электрического поля, выступающего в роли самостоятельного фактора ДМ глубинных разломов. В этой связи уместно обратиться к вопросу образования наиболее совершенной кристаллической фазы углерода – алмазов метаморфического происхождения. Проявления таких алмазов отмечены в нескольких районах докембрия зарубежных стран, но наиболее достоверно и подробно они описаны в пределах Кокчетавского срединного массива среди метаморфических пород амфиболитовой фации. На УЩ они обнаружены в погребенных морских россыпях Среднего Приднестровья.

По данным [7] коренные проявления Северного Казахстана сопряжены главным образом с биотит-гранатовыми гнейсами, отчасти с прослоями гранат-пироксеновых и пироксен-карбонатных пород, но их нет в сопутствующих гранито-гнейсах, мусковит-дистен-гранатовых сланцах и телах эклогитов вероятно протрузивного происхождения. Весь комплекс вмещающих алмазы пород деформирован в зоне глубинного разлома с отчетливыми признаками дислокационного метаморфизма [8].

В числе особенностей при обсуждении минерализации отмечено, что включения мелкозернистых алмазов сосредоточены только в гранате и представлены двумя генерациями. Из них ранняя обладает кубооктаэдрическими формами и выполняет роль зародыша, который обрастает более совершенными кубическими кристалликами. Несомненно, парагенетическим спутником алмаза является графит, который также представлен двумя генерациями. Первая образует включения в алмазе, а вторая располагается в межзерновом пространстве или трещинках граната. Подчеркнут кратковременный импульсный характер кристаллизации алмаза и непостоянство условий в момент роста его кристаллов вследствие неравномерности режима пересыщения флюида, содержащего метан – предполагаемый источник углерода для образования алмаза и графита.

Для объяснения генезиса алмазов в [7] привлечена традиционная модель сверхвысоких давлений при метаморфизме с температурой  $1173^{\circ}$ – $1273^{\circ}$ К ( $900$ – $1000^{\circ}$ С). При обсуждении модели сами авторы подчеркивают ее несовместимость с реальными геологическими условиями. В числе других противоречий обращено внимание на слабую веро-

ятность кристаллизации полиморфных модификаций углерода в принятой системе С-Н-О в зависимости от роста Т и Р. Отмечено, что с повышением температуры во флюиде возрастает концентрация углерода и наступает пересыщение с последующей кристаллизацией. Наоборот, рост давления вызывает обратный эффект, который не совмещается с высокобарической моделью.

Выход из подобных противоречий можно найти в условиях ДМ, который предусматривает влияние физических полей. Обратиться к экспериментальной генетической модели, развивающей описанную выше схему образования графита при диссоциации карбоната, позволяет несколько обстоятельств: 1) приуроченность алмазных проявлений к зоне глубинного разлома, 2) исключительное положение алмазных зерен в зернах граната, 3) несомненный парагенезис алмаза и графита, 4) отсутствие необходимости обращаться к высокобарическим моделям. При этом алмазоносный гранат по соотношению щелочноземельных оксидов допустимо расценить как показатель присутствия исходных карбонатов типа брейнерита и анкерита, характерных для метасоматитов глубинных разломов [4].

Проведенные нами эксперименты по синтезу алмаза [5] свидетельствуют о том, что рост кристаллов алмаза может эффективно осуществляться в твердой среде при температурах до 1050°K (777°С) и атмосферном давлении. Впервые физико-математическая модель динамики химической связи в поле точечного заряда (иона) была нами разработана и использована в качестве сценария элементарных химических актов, протекающих на поверхности растущего кристалла алмаза [5]. Одним из важнейших свойств алмаза, впервые обнаруженном экспериментально [5], является наличие генетического центра с рудиментарными признаками зародыша динамического происхождения. На основании полученных результатов дано объяснение дискретности алмазообразования, предложен новый физический механизм образования сингенетических включений и разработана физическая интерпретация их минералогической специализации в соответствии с энергетическими параметрами граней кристалла.

Физико-химическая активность поверхности может проявляться не только при наличии активных зон (мест выхода дислокаций, например), но и в результате появления на поверхности электрических зарядов (ионов). При комнатной температуре напряженность электрического поля, вызванная одновалентным ионом на расстоянии  $10^{-8}$  м, составляет примерно  $1,4 \cdot 10^7$  В/см. По расчетам [5] ионы оказывают "разрыхляющее" действие на химическую связь. Одним из возможных параметров, описывающих механизм роста алмаза, является поверхностная химическая реакция, протекающая в поле иона между углеродсодержащей молекулой, ионом и поверхностными атомами углерода.

Таким образом, процессы химических превращений обусловлены преимущественно кинетиче-

скими параметрами (функциональное состояние поверхности, наличие зарядов, их плотность и т.д.). Температура в данном случае является активационным фактором и определяет при всех прочих равных условиях время роста и эффективность процесса. Давление же может опускаться до незначительных величин, которые соответствуют периодам декомпрессии изменчивого геодинамического режима глубинных разломов. Предложенный вариант условия образования алмазов метаморфического происхождения согласуется с геолого-минералогическими особенностями среды их нахождения и потому выглядит реальным.

Помимо твердых минеральных фаз, при ДМ возникают и газообразные продукты, например, – метан в угольных пластах, что можно видеть при анализе геологической обстановки проявлений и районов внезапных выбросов метана на примере Донецкого бассейна. В данном случае обращает внимание их приуроченность к узлам пересечения неоднократно активизированных глубинных разломов кристаллического основания ДДВ, проникающих в угленосную толщу пород и периодически вызывающие стресс при подвижках.

В этих условиях примером аномальной физико-химической активности твердых тел может служить явление внезапного выброса угля и газа в процессе подземной разработки угольных месторождений. С точки зрения существующих механизмов газодинамических явлений невозможно дать ответ на вопрос об образовании большого количества свободного газа и причин интенсивной десорбции в период зарождения и развития выброса. По различным оценкам количество выделяющегося газа на одну тонну угля составляет 8-40 кг.

В работе [9] предлагается потенциальную выбросоопасность рассматривать как меру нестабильности структуры угля, а выделение большого количества газа – как следствие твердофазных химических превращений части структурных элементов угля в газы. Воздействия, которые претерпевают углевмещающие породы при активизации тектонических процессов, являются сложными и носят комплексный характер. Породы (в т. ч. и уголь) подвергаются не только простому сжатию, но и пластическому деформированию, в результате которого в них возникают сдвиговые деформации. Сложность процесса обусловлена также локальным действием высоких температур в результате сдвига, трения частиц и т.п. активизирующих как физико-химическую кинетику реакций, так и флуктуационные поверхностные явления в целом.

При пластическом деформировании в породе часть работы, совершенной во время воздействия, превращается в тепло, а оставшаяся энергия накапливается в микроструктуре породы в виде дополнительной внутренней запасенной энергии. Таким образом, породы, подвергнутые пластическому деформированию (например, ориентированному сжатию со сдвигом), переходят в термодинамически

менее устойчивое состояние. Общей закономерностью для механизмов накопления энергии является то, что большая доля запасенной энергии накапливается благодаря несовершенствам кристаллической структуры: точечным, линейным, плоским и объемным дефектам. Факторы, влияющие на запасенную энергию, связаны с историей процесса деформирования (тип, степень деформации, температура и др.) и с особенностями структуры обрабатываемого материала (состав, строение, состояние).

Исследования ряда горных пород [10] при кручении (сдвиге) и условиях ориентированного сжатия выявили закономерность, характеризующуюся тем, что для пород с более высокими пластическими свойствами необходимы и более высокие сжимающие усилия, в результате которых происходит взрывное разрушение. Для углей минимальное давление составляло  $(5 - 6,5) \cdot 10^8$  Па, а для неподверженных внезапным выбросам –  $(1 - 1,1) \cdot 10^9$  Па [11]. Таким образом, при тектонических процессах для углей различной степени метаморфизма необходимы существенно различные минимальные давления, в результате которых микроструктура угля способна накопить необходимую избыточную энергию для потенциальной выбросоопасности.

К особенностям структуры угля как к факторам, влияющим на величину запасенной энергии, относятся размеры микрористаллов, их ориентировка, наличие включений минеральных фаз, растворенных элементов, внутренняя поверхность угля и др. Уголь, накопивший высокую запасенную энергию при сложных внешних воздействиях, переходит в состояние глубокой метастабильности, обусловленной образованием всякого рода дефектов, в т.ч. метастабильных радикалов. Это состояние сохраняется за счет естественной консервации в обстановке всестороннего сжатия. Деформированный уголь стремится к возврату структуры, пытаясь снизить приобретенный запас энергии путем снижения степени пересыщения дефектами в соответствии с термодинамическими параметрами (температура, давление), в которых он «законсервирован». Движущей силой возврата или процесса перехода структуры в более устойчивое состояние является запасенная энергия, т.е. уровень приобретенной метастабильности.

Поскольку в естественном залегании уголь находится в условиях объемного напряженного состояния, то процессы перехода принципиально не могут осуществляться за счет перехода потенциальной энергии упругого состояния в кинетическую энергию. На этой стадии, с точки зрения кинетики и термодинамики, выгодно превращение органической массы угля в газ за счет перехода части запасенной энергии по радикальному или молекулярному пути. Таким образом, следует ожидать, что уголь, как и любая другая система, будет стремиться к минимуму энергии за счет структурной внутренней самоорганизации.

При высокой плотности образовавшихся радикалов или метастабильных групп ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2\text{OH}$  и др.) наиболее вероятна реакция, протекающая между ними, с образованием стабильных молекул и выделением тепла. Для такого рода реакции требуется небольшая энергия активации (до 10 кДж/моль). Образовавшиеся стабильные молекулы газа ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  и др.) локализуются на границах зерен или внутри зерен – в местах скопления дефектов. Часть радикалов остается «законсервированной» до момента выброса, когда разрушение и дополнительное деформирование частиц угля инициирует образование новых молекул газа.

Спровоцировать потенциальную выбросоопасность в метастабильной структуре угля могут упругие колебания, распространяющиеся в пласте при работе машин и механизмов. «Законсервированные» радикалы или метастабильные группы атомов, поглощая энергию упругих колебаний, переходят в газ. Так как пласт угля находится в условиях геостатического давления, слабо меняющего параметры твердой фазы, газ может концентрироваться в плотные состояния до момента наступления равновесия с вмещающей твердой фазой и в целом системы «уголь-газ» – с внешними физическими условиями.

Таким образом, возбуждение взрывного разрушения угля, характеризующего выброс как явление, сводится к неизотермической задаче с условием, что запас упругой энергии должен быть достаточным для создания эффективного очага химических превращений. Застабилизировавшись, система «уголь-газ», представляет своеобразный законсервированный этап взрывного разрушения (остановленный взрыв), уравновешенный всесторонним сжатием. При приближении выработки к выбросоопасному участку угольного пласта в последнем нарушается равновесие в связи с нарушением состояния всестороннего сжатия, т.е. когда наступает процесс катастрофически быстрого снижения до нуля нормальных напряжений.

По аналогии с детонационным превращением химических ВВ, когда твердая фаза переходит в газообразную полностью, взрывчатое превращение в деформированном угле протекает частично лишь на активных участках поверхности угля – будь то межзеренные поверхности или поверхности микропор внутри зерна. Но в силу особенностей всестороннего сжатия процесс взрывного разложения останавливается, а потенциальная энергия консервируется. В дальнейшем при выбросе сценарий повторяется, но при этом продукты химических реакций расширяются, давление падает и реакция образования уголь-газ резко затухает. Энергия расходуется на дробление угля преимущественно до размеров частиц, ограниченных активными поверхностными состояниями.

Другим, не менее выразительным примером преобразования твердых минеральных фаз под воздействием стресса внутри разломных структур мо-

жет послужить эндогенная усадка объема железистых кварцитов (ЖК) в зонах метаморфического будинажа их пластов в процессе сбросо-сдвиговых дислокаций в глубинных разломах, подробно описанная нами в [12]. Такая усадка объема слоисто-полосчатых ЖК – уникальное свидетельство рудообразующей роли дислокационного метаморфизма. Она выражается в избирательном растворении кварцевых и сближении рудных слоев при сохранении плотности пород. В результате ЖК, содержащие 28-36 % железа, преобразуются в богатые магнетитовые и сидероплезит-магнетитовые руды, в которых концентрация железа составляет 52-56 %, что обусловлено его содержанием в рудных слоях. Такие руды составляют первооснову мощных крутопадающих рудных столбов в полигенетических месторождениях саксаганского и первомайского типов в Криворожском бассейне.

Важнейшей предпосылкой возникновения метаморфогенных будинаж-структур является равномерная расслоенность разреза железорудных свит на контрастные по физико-механическим свойствам пласты ЖК и сланцев. Этому условию идеально соответствует слоисто-полосчатая текстура ЖК, в которых рудные и кварцевые слои резко отличаются по упругим свойствам. На региональном уровне эти особенности реализуются при подвижках в зонах долгоживущих глубинных разломов, которые порождают стресс, составляющий основную причину усадки объема ЖК.

В существенно кварцевых слоях зерна наиболее хрупкого минерала (кварца) повсеместно контактируют между собой. Они интенсивно растрескиваются и микрогранулируются. В результате резко возрастает водопроницаемость таких слоев, что способствует растворению кварца. Рудные слои слагаются магнетитом, сидероплезитом и кварцем. Пределы упругости рудных минералов в 2-4 раза превышают характеристики кварца. Поэтому при наложении стресса сростки кварцевых зерен в рудных слоях бронируются от растворов и все минералы этих слоев испытывают только перекристаллизацию. Избирательное растворение и вынос кремнезема из кварцевых слоев осуществляется в метаморфогенных гидротермальных растворах. Экспериментами Ф.М. Сыромятникова [13] показано, что, начиная с определенных соотношений величин литостатического и ориентированного сжатия (например, соответственно, 1 и  $4 \cdot 10^8$  Па) растворимость кварца резко повышается.

Выше отмечалось, что на поверхности кристаллов активными в химическом отношении являются дислокации. Высокая физико-химическая активность кварца обусловлена энергетическим фактором, т.е. запасенной энергией, связанной с накоплением дислокаций. При этом значения запасенной энергии при разнообразных процессах деформирования свидетельствуют о том, что чем проще условия деформирования (например, простое сжатие), тем меньше запасенная энергия. Эффективным ме-

ханическим воздействием, которое может быть следствием тектонической активности, является сдвиг при ориентированном сжатии. В таких условиях установившиеся значения плотности дислокации или относительной доли запасенной энергии будет выше [17] по сравнению с простым сжатием. Сама дислокация не является активным центром. Согласно Ю.А.Красулину [14] формирование активного центра обусловлено атомами, находящимися в области упругих искажений вокруг дислокации. Диаметр таких активных участков составляет в среднем (на примере кремния) около  $7 \cdot 10^{-11}$  м. Таким образом очевидно, что при высоких плотностях дислокаций ( $10^{10}$  -  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>) поверхность механически активированного кристалла в несколько раз превысит поверхность исходного.

Атомы на поверхности в поле упругих искажений разрывают старые межатомные связи, образуются новые метастабильные химические связи. В тонком приповерхностном слое появляются “механические” парамагнитные центры, спектр которых принадлежит радикалам  $\equiv\text{Si}$ ,  $\equiv\text{SiO}$ , атомам кремния с двумя разорванными связями  $\equiv\text{Si}$ : [15]. Метастабильные связи на поверхности кварца по своим химическим свойствам по мнению В.А.Радцига похожи на радикальные пары  $\equiv\text{Si} \dots \text{OSi} \equiv$ . Энергия активации реакции такой пары с водородом даже (при  $T=80^\circ\text{K}$ ) [15] составляет всего около 10 кДж/моль, т.е. соответствует свободнорадикальным реакциям. Парамагнитные центры на поверхности кварца отличаются высокой реакционной способностью по отношению к молекулам газожидкого флюида, в результате реакции с ними образуют новые поверхностные или самостоятельные фазы.

В месте выхода краевой дислокации образуется глубокая электронная ловушка, энергия связи которой с электроном (на примере ионных кристаллов [16]) может превышать 0,5 эВ. Таким образом, локализованный поверхностный заряд существенно снижает высоту термодинамического барьера, в связи с чем реакция поверхностных атомов кварца с компонентами флюида будет обусловлена преимущественно кинетическими закономерностями [6]. Процесс взаимодействия кварца с водой и вынос кремнезема из зон реакции будет протекать активно, а с понижением температуры гидролиза – еще более эффективно [18].

Вынос растворенного кремнезема осуществляется через межзерновое пространство микрогранулированных зерен кварца и поперечные микротрещинки кливажа разлома-растяжения рудных слоев. По мере их сближения наступает соприкосновение рудных слоев и усадка ЖК прекращается. В итоге усадки формируются по сути эндогенно-остаточные кварц-магнетитовые и сидероплезит-магнетитовые богатые руды, появление которых не связано с магматизмом и может быть объяснено только условиями и процессами ДМ. В отличие от предшествующих примеров в этом случае наблюда-

ется не появление, а исчезновение прежних твердых фаз.

Приведенная информация затрагивает группу минеральных видов, которая характеризует условия метаморфизма зон глубинных разломов. Среди них упомянуты общеизвестные стресс-минералы и обсуждены типоморфные для таких зон минеральные фазы разного агрегатного состояния, образование которых трудно представить за пределами разломных структур. К ним отнесены новообразования графита и алмаза в метаморфических породах, выделения метана в угольных пластах и явления избирательного растворения кварца в ЖК. Все они образовались за счет вещества материнских пород, без привноса извне и потому имеют метаморфическое происхождение. Показано, что в образовании или исчезновении типоморфных минералов сопряжены комбинации факторов, характерные только для дислокационного метаморфизма и маловероятные в его иных генетических типах. Среди таких факторов особое место занимает минералогенирующая роль электрических полей. Тем самым отмеченные минеральные фазы и процессы их образования подтверждают правомерность обособления дислокационного метаморфизма в самостоятельный генетический тип.

Рассмотренные примеры свидетельствуют, что в формировании конкретных минеральных фаз роль отдельных факторов неодинакова и они комбинируются в разных количественных соотношениях. В частности, при эндогенной усадке ЖК и образовании метана в угольных пластах определяющую роль играет стресс, а в случае графита и алмаза на первое место выдвигается термоэлектрический эффект, который порождается трением междудвигающимися блоками пород. Условия изменчивого геодинамического режима долгоживущих глубинных разломов определяют разное время возникновения обсуждаемых минеральных фаз.

Наряду с различиями, обращает внимание общий – кинетический, удаленный от равновесия, характер процессов минералообразования в зонах ДМ, что связано с нестабильным состоянием пород и минеральных индивидов вследствие их дислокаций на разных по масштабам уровнях – от регионального до микроскопического.

Приведенные примеры имеют и практическое значение в форме предпосылок открытия метаморфогенных алмазов в гнейсах и кальцифирах среди разломных структур УЩ, на пути усовершенствования поисковых критериев метаморфогенных железных руд, и, особенно, в разработке принципиально новых теоретических основ прогнозирования выбросоопасных районов выделения метана в угольных пластах, в итоге – эффективных способов борьбы с выбросами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Орлинская О.В., Соболев В.В., Чернай А.В. Термоэлектрическая обработка минералов и горных пород. – Днепропетровск, 1999. – 93 с.
2. Казанский В.И., Звягинцев Л.И., Прохоров К.В. Эндогенное оруденение древних щитов. – М., 1979. – 198 с.
3. Елисеев Н.А. Метаморфизм. – Л., 1959. – 415 с.
4. Иванкин П.Ф. Флюидно-магматогенные колонны глубинных разломов и прогноз оруденения // Глубинные условия эндогенного рудообразования. – М., 1986. – С. 103 – 113.
5. Соболев В.В., Ярковой Г.О., Чернай А.В. Синтез алмаза 3. Теоретические исследования с применением квантовомеханических методов расчета // Минералог. журн. – 1994. – №5/6. – С. 23 – 30.
6. Фольмер М. Кинетика образования новой фазы. – М., 1986. – 208 с.
7. Соболев Н.В., Шацкий В.С., Заячковский А.А. Алмазы в метаморфических породах Северного Казахстана // Геология метаморфических комплексов: Межвуз. тематич. сб. – Свердловск, 1989. – С. 21 – 35.
8. Летников Ф.А., Зорин Ю.М., Заячковский А.А. Роль активизации в формировании оруденения на Кокчетавской глыбе (Северный Казахстан) // Закономерности размещения полезных ископаемых. – 1975. – Вып. 9. – 367 с.
9. Соболев В.В. Комплекс физико-химических явлений, инициирующих выбросы угля образование газа // Наук. вісник. – 2000. – № 4. – С. 46 – 48.
10. Волярович М.П., Пархоменко Э.И. Исследование разрушений при кручении тонких образцов горных пород при одностороннем давлении // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1957. – №2. – С. 190 – 199.
11. Волярович М.П., Пархоменко Э.И. Воспроизведение внезапных выбросов угля при сжатии и одновременном кручении тонких образцов // Тр. геофиз. ин-та АН СССР. – 1956. – №34. – С. 193 – 207.
12. Белевцев Я.Н., Кравченко В.М., Кулик Д.А. Железисто-кремнистые формации докембрия Европейской части СССР: Генезис железных руд. – Киев, 1991. – 216 с.
13. Сыромятников Ф.М. Экспериментальные исследования растворимости кварца в гидротермальных растворах // Экспериментальные исследования в области глубинных процессов. – М., 1962. – 403 с.
14. Красулин Ю.А. Дислокации как активные центры в топохимических реакциях // Теор. и exper. химия. – 1967. – №1. – С. 58 – 62.
15. Радциг В.А. Химически активные центры на поверхности измельченного кварца // Докл. VII Всес. симп. по механоэмиссии и механохимии твердых тел. – Ташкент, 1981. – С. 24 – 28.
16. Молоцкий М.И. Каталитическая активность дислокаций // Кинетика и катализ. – 1972. – Т. 13. – С. 898 – 907.
17. Захарова М.И. Атомно-кристаллическая структура и свойства металлов и сплавов. – М., 1972. – 215 с.
18. Берштейн В.А., Мовчан Ю.Н., Никитин В.В. Влияние механических напряжений на гидролиз связей поверхности кварца // Физ. твердого тела. – 1972. – Т. 14, вып. 9. – С. 2792 – 2794.