

## МЕЗОПРЕОБРАЗОВАНИЯ КАК ПРИЧИНА СТРУКТУРНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕСТРОЕК

*Е.Н. Диман*

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск*

Рассмотрены вопросы мезопреобразований в геологии. Была выдвинута гипотеза (Диман, 2004), что причиной мезопреобразований в горных породах являются рои нанотрещин и небольшой температурный градиент. Распространение мезопреобразований происходит при фиктивном перемещении нанотрещины в область повышенных температур. Мезопреобразования предваряют и способствуют проявлению многих геологических событий (полосообразное нарушение прочности пород, землетрясения, образование даек и трубок, в том числе алмазоносных, продольное и поперечное перемещение слоев). Скорость перемещения мезопреобразований составляет несколько сот метров в секунду.

Для веществ определены минимальные температуры, при которых начинаются мезопреобразования без приложения внешних нагрузок. Делается вывод, что мезопреобразования широко распространены в породах земной коры.

В данной работе предлагается также модель структуры зоны мезопреобразований и рассматриваются различия мезопреобразований в металлах и силикатных породах (на примере гранита). Приводятся достаточные признаки того, что мезопреобразования – это результат поперечного перемещения нанотрещин.

**Ключевые слова:** мезопреобразование, нанотрещина, температурный градиент, горные породы.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия был открыт и исследован новый вид преобразований веществ – мезопреобразования [8]. Опыты в основном проводились на металлах и сплавах. От обычных разрушений, в широком понимании этого слова, вызванных линейными механическими силами на макромасштабном уровне [3], мезопреобразования отличаются рядом характерных свойств [9]. Преобразования на мезоуровне без внешнего приложения сил предполагают внутреннюю перестройку вдоль фронтальной границы полосы, распространяющейся с большой скоростью и малой диссипацией энергии [15, 17].

Было замечено, что линейное распространение полосы мезопреобразований, как правило, начиналось с краевых участков пластин металлов в сторону источника тепла при достижении определенных температур. Мезопреобразования сопровождалась выделением упругих волн (звук) [14]. Была выдвинута гипотеза [5], что мезопреобразования широко распространены в геологических структурах и предшествуют многим геологическим событиям, опережая их и циклически повторяясь, начиная от ступенчатого подъема магм и образования даек и штоков и кончая

разрядкой энергии в напряженных областях. Было высказано предположение, что начало мезопреобразованиям положено активизацией роя нанотрещин, которые движутся в сторону источника тепла (вдоль градиента температур), оставляя за собой ослабленную зону в породах, (подобие трещин, заполненных разрушенным материалом при предплавленных температурах), что, в свою очередь, уменьшает прочность пород в сотни и тысячи раз [2].

В данной работе уточнены скорости линейного распространения мезопреобразований, определены их минимальные температуры в отсутствие внешних сил (растяжения или сжатия) и предложена модель структуры зоны мезопреобразований. Рассматривается отличие мезопреобразований металлов и горных пород и приводятся дополнительные факты из геологической практики, подтверждающие возможность мезопреобразований в породах земной коры.

### МЕЗОПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ОБЫЧНЫЕ РАЗРУШЕНИЯ

Разрушение естественных образований происходит на разных масштабных уровнях. Масштабирование объектов в геологии можно свести, в основ-

ном, к трем обычно различаемым образованиям. Это, прежде всего, кристалл, как сочетание молекул, порода, состоящая из множества определенного типа кристаллов, и пачка пород, обладающих разными физико-химическими свойствами и потому имеющих поверхностные границы раздела друг с другом. Их разрушения можно подразделить на обычные разрушения, в широком понимании этого слова, и мезопреобразования, отличающиеся рядом характерных свойств.

Обычные разрушения вызваны в основном линейными механическими силами и приводят к разрушению кристаллов (разрыв связей между молекулами кристалла с образованием новых поверхностных границ), для пород – это смятие и деформации с образованием складок, разрывные нарушения с горизонтальным и вертикальным противоположным перемещением слоев вдоль разрывов [10] и тому подобное.

Преобразования на мезоуровне предполагают внутреннюю перестройку вдоль фронтальной полосы, распространяющейся с большой скоростью и малой диссипацией энергии [15]. Отличие от волн (например, сейсмических) заключается в линейном полосообразном распространении мезопреобразований. Это наводит на мысль, что причиной мезоуровневых преобразований является перемещение определенного типа дефектов, свойственных каждому уровню.

Дефекты кристалла хорошо известны – это, в основном, дислокации, вакансии, микровключения, микропустоты и микротрещины. Для породы, состоящей из кристаллов и межзернового цемента, характерны те же дефекты с большей концентрацией последних (разнородные включения, микропустоты и микротрещины) в межзерновом цементе. Для пачки пород дополнительно появляются поверхностные границы раздела с тем же сочетанием дефектов.

Ясно, что вакансии, ввиду их малой концентрации, даже при высоких температурах не могут служить источником перестройки структуры при мезопреобразованиях. Это можно сказать и о микропустотах и микровключениях – слишком мала скорость их перемещения.

Энергия дислокаций на единицу длины,  $W_d$ , всегда присутствующих в кристалле, приблизительно равна  $Gb^2$ . Здесь  $b$  – вектор Бюргерса,  $G$  – модуль сдвига. Для создания новых дополнительных дислокаций требуются большие сдвиговые усилия, что отсутствует в опытах с пластинками металлов на подложках. Кроме того, перемещение дислокаций, требующее также определенных усилий, не приводит к

заметной перестройке, как это наблюдается в четко видимой полосе мезопреобразований в опытах. Восходящие дислокации обычно перемещаются с диффузионной скоростью ( $\sim 10^{-4}$  см/с). Очень привлекательно, что скользящие и восходящие дислокации не распространяются в форме волны, но это не является достаточным аргументом в их пользу.

Рассмотрим оставшийся дефект – это трещины, присутствующие на всех трех масштабных уровнях. Ясно, что трещины и микротрещины способны влиять только на обычные разрушения, значительно понижая критический порог прочности кристаллов и пород [12]. Напряженные зоны расположены в устьях этих трещин. При значительном уменьшении их размеров напряженные зоны сливаются, окружая трещину, так что последняя оказывается полностью “погруженной” в напряженную зону. Назовем такие трещины нанотрещинами. Деформации кручения и сдвига, которые могут локально создаваться напряжениями вокруг нанотрещин при наличии температурного градиента,  $\Delta T$ , по разные стороны нанотрещины, могут при повышенных температурах способствовать началу мезопреобразований. Так как амплитуда колебаний атомов с “горячей” стороны нанотрещины чуть больше, чем с противоположной, то произойдет перескок атома на менее нагретую поверхность трещины. Кроме того, он потянет за собой наиболее прочно связанные с ним атомы. То есть трещина плоской стороной фиктивно двигается в сторону наибольшей температуры и является стоком, где гасятся вакансии и дислокации с выделением энергии, поддерживая высокую температуру на “горячей” стороне нанотрещины. В отличие от металлов, в гетерогенных объектах, силикатах и алюмосиликатах, единицей преобразований является не атом, а молекула, так как разрыв валентных связей происходит по наиболее слабым из них. Можно считать, что наиболее прочно связаны оксиды, входящие в формулу минерала, что необязательно, и единицей перемещений (для удобства расчетов) можно считать последовательность перемещений оксидов, хотя единица перемещений может быть и более сложной.

На рисунке 1а схематично показана нанотрещина, шириной  $2b$ , и матрица, состоящая из трех сортов атомов, где слабые связи показаны пунктиром. Предположим, что существует градиент температур и слабые связи между атомами (пунктир) разрываются по линии CD. Выберем единицу перемещения, обычно оксиды, как наиболее прочно связанные молекулы в сложном образовании (на рисунке 1 внизу). Разрыв слабых связей по достижении критической амплитуды молекулы приведет в конечном итоге к перемеще-

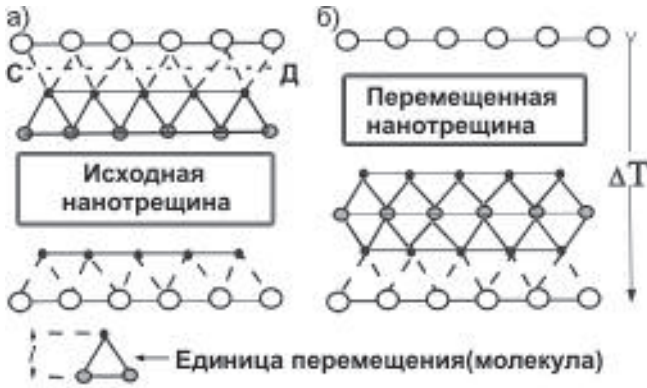


Рис. 1, а, б. Перемещение нанотрещины при мезопреобразованиях в гетерогенных средах.

нию слоя молекул на “холодную” сторону нанотрещины, и нанотрещина фиктивно займет новое положение (рисунок 1,б). В работе [5] было установлено, что скорость выхода молекулы в полость нанотрещины определяется уравнением:

$$V = 4 \pi^2 m / \chi E \tau_0^3. \quad (1)$$

Здесь  $m$  – масса молекулы,  $\chi$  – числовая функция,  $E$  – модуль упругости,  $\tau_0$  – частота колебаний центра тяжести молекулы. Сравнив результаты расчета со средней арифметической скоростью поступательного движения молекул идеального газа из закона Максвелла в замкнутой полости:

$$V_g = (8kT/(\pi m))^{1/2}, \quad (2)$$

можем выбрать  $\chi$  и, соответственно, частоту колебаний и скорость выхода молекулы в равновесную газовую фазу (табл. 1).

Частота рассчитывается, исходя из уравнения (3):

$$\tau_0 = 2\pi(m/\chi El)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $l$  – линейный размер молекулы.

Данные таблицы 1 рассчитаны для температуры 800 К. В закрытой полости линейная скорость молекул меди при  $l = 3 \cdot 10^{-10}$  м,  $T = 800$  К,  $E \approx 10^7$  Н/см<sup>2</sup> составляет по уравнению (2) 516 м/с. Наиболее близко полученному значению скорости соответствует строка таблицы, выделенная жирным шрифтом. Это значит, что отклонение атома от узла кристаллической решетки на 14% (столбец 1) приведет к обязательному переходу его в газовую фазу. Частота колебаний составляет  $5,77 \cdot 10^{-13}$ , а безразмерный множитель  $\chi$  равен примерно 0,417. Для температуры 1100 К (нижняя часть таблицы) увеличивается скорость выхода молекул в газовую фазу примерно на 100 м/с, тогда как отклонение ядра от положений равновесия и частота колебаний атома изменяются незначительно, что следует из классической физики. Действительно, произведение  $El$  при повышенных темпера-

Таблица 1. Минимальные амплитуды и скорости мезопреобразований веществ.

Амплитуда, в долях от 1	Межатомное расстояние, l, см	Числовая функция, $\chi > 0$	Частота колебаний молекулы, $\tau_0$ , сек	Линейная скорость молекулы, м/с
<b>T = 800K, Vg = 516 м/сек</b>				
0.1	$1 \cdot 10^{-8}$	22.08	$1.3734 \cdot 10^{-13}$	727
0.1	$3 \cdot 10^{-8}$	0.8178	$4.1201 \cdot 10^{-13}$	727
0.1	$6 \cdot 10^{-8}$	0.1022	$8.2412 \cdot 10^{-13}$	727
0.135	$1 \cdot 10^{-8}$	12.1152	$1.85407 \cdot 10^{-13}$	539
0.135	$3 \cdot 10^{-8}$	0.448712	$5.5622 \cdot 10^{-13}$	539
0.135	$6 \cdot 10^{-8}$	0.056089	$1.11244 \cdot 10^{-12}$	539
0.14	$1 \cdot 10^{-8}$	11.2653	$1.92274 \cdot 10^{-13}$	519.6
<b>0.14</b>	<b><math>3 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b>0.417234</b>	<b><math>5.76821 \cdot 10^{-13}</math></b>	<b>519.6</b>
0.14	$6 \cdot 10^{-8}$	0.0521542	$1.15364 \cdot 10^{-12}$	519.6
0.15	$1 \cdot 10^{-8}$	9.8133	$2.0601 \cdot 10^{-13}$	485
0.15	$3 \cdot 10^{-8}$	0.3634	$6.1807 \cdot 10^{-13}$	485
0.15	$6 \cdot 10^{-8}$	0.04543	$1.2361 \cdot 10^{-12}$	485
<b>T = 1100K, Vg = 606 м/сек</b>				
0.1	$1 \cdot 10^{-8}$	30.36	$1.17123 \cdot 10^{-13}$	853
0.1	$3 \cdot 10^{-8}$	1.12444	$3.56368 \cdot 10^{-13}$	853
0.1	$6 \cdot 10^{-8}$	0.14055	$7.02734 \cdot 10^{-13}$	853
0.135	$1 \cdot 10^{-8}$	16.5684	$1.58116 \cdot 10^{-13}$	632
0.135	$3 \cdot 10^{-8}$	0.616979	$4.74346 \cdot 10^{-13}$	632
0.135	$6 \cdot 10^{-8}$	0.0771224	$9.48692 \cdot 10^{-13}$	632
0.14	$1 \cdot 10^{-8}$	15.4898	$1.63972 \cdot 10^{-13}$	610
<b>0.14</b>	<b><math>3 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b>0.573696</b>	<b><math>4.91915 \cdot 10^{-13}</math></b>	<b>610</b>
0.14	$6 \cdot 10^{-8}$	0.071712	$9.83829 \cdot 10^{-13}$	610

турах почти не изменяется, так как с повышением температуры  $E$  несколько уменьшается, а  $l$  чуть увеличивается, поэтому их произведение близко к постоянной величине. Здесь же отметим, что отклонение атома от узла кристаллической решетки на 14 процентов позволяет считать приведенные формулы пригодными для дальнейших оценок, так как в равновесных условиях при предплавильных температурах отклонение разного сорта атомов составляет 6 – 12 %. Значения параметров таблицы 1 примем как исходные, поскольку при их достижении весь приграничный слой перейдет в газовую фазу. Достижение критического отклонения обеспечивается напряженной зоной, полностью включающей в себя нанотрещину.

Здесь же отметим, что при температурах меньших, чем начальная минимальная температура, мезопреобразования в металлах возможны лишь при приложении внешних механических усилий, а также могут наблюдаться в напряженных зонах в условиях земной коры.

### ПЕРВЫЙ “ТОЛЧОК”

Для активизации молекул и перехода их на другую сторону нанотрещины необходимо внешнее, по отношению к трещине, воздействие, внешнее по-

Таблица 2. Энергия атома меди при разных температурах.

Температура, К	300	600	800	1000	1100	1200	1357
Энергия, Н м, на один атом	$4.14 \cdot 10^{-17}$	$8.28 \cdot 10^{-17}$	$1.104 \cdot 10^{-16}$	$1.38 \cdot 10^{-16}$	$1.518 \cdot 10^{-16}$	$1.656 \cdot 10^{-16}$	$1.872 \cdot 10^{-16}$

ступление энергии. Последняя складывается из механической и тепловой энергии. Запасенная в напряженной зоне вокруг нанотрещины механическая энергия и тепловая энергия в момент нагрева образца, когда разница температур “горячей” и “холодной” стороны нанотрещины может быть в три-четыре раза больше (зависит от теплопроводности материала, мощности источника тепла и размеров (площади и ширины) нанотрещины), чем при установившемся динамическом равновесии. В таблице 2 приведена полная энергия ядра атома меди, из которой видно, что энергия, приходящаяся на один атом, в первоначальный момент нагрева с “горячей” и “холодной” стороны трещины может отличаться на полпорядка (максимальная разница температур на противоположных сторонах нанотрещины). По этой причине движение нанотрещины по достижении критической активизации молекул поверхности “горячей” стороны нанотрещины начинается в сторону источника тепла.

Если энергии, запасенной в напряженной зоне вокруг нанотрещины, недостаточно, то требуется дополнительное внешнее динамическое нагружение материала для активизации мезопреобразований, ведущее к пластической деформации и микроразрушению. В этом случае мезопреобразования носят локальный характер типа скольжения или с образованием ламельной структуры мезополос (двойных спиралей) [7, 8].

Если ширина трещины имеет размер в несколько Бюргерсов, то при первом перескоке молекул на “холодную” сторону уменьшится первоначальный температурный градиент. Поэтому после первого “толчка” изменится и режим мезопреобразований.

#### ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ПОЛОСТИ НАНОТРЕЩИНЫ

Конкретизируем расчеты к какому-либо определенному объему. Пусть размеры трещины будут  $1\text{см} \times 1\text{см} \times 10b$ , где  $b$  – вектор Бюргерса, в данном случае равный межатомному расстоянию,  $3 \cdot 10^{-8}$  см. Примем  $P_0 = 10^{-9}$  (Тор) =  $(1/760) \cdot 10^{-9}$  (атм) =  $1,316 \cdot 10^{-8}$  Н/м<sup>2</sup> (рис. 2). Масса газа в полости на один атомный объем составит  $M = \mu PV / (RT)$ , где  $\mu$  – молекулярный вес меди,  $R = 8,31441$  (Дж/моль К) – газовая постоянная. Тогда  $M = 3,77113 \cdot 10^{-25}$  г, а  $n = NM / (\mu V) = 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 3,77113 \cdot 10^{-25} / (63,546 \cdot 3 \cdot 10^{-7}) = 1.19 \cdot 10^4$  молекул в одном сантиметре кубическом.

При первом толчке, когда молекулы на плоскости “горячей” стороны трещины полностью активизируются для выхода в газовую фазу, их концентрация в данном объеме составит  $1/(l^2 \cdot 10b) = 1/(9 \cdot 10^{-16} \cdot 3 \cdot 10^{-7}) = 3,7037 \cdot 10^{21}$  молекул на см<sup>3</sup>.

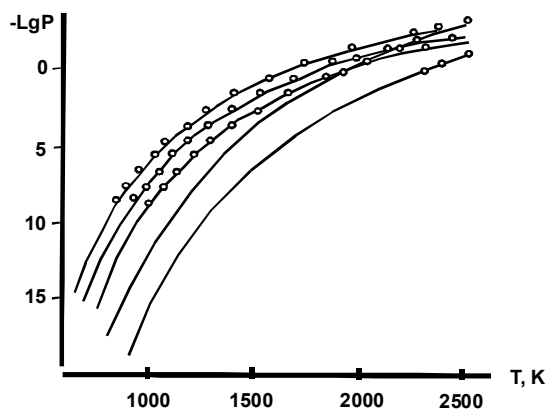
С большой скоростью (500–600 м/с, табл. 1), сметая все на своем пути, эта огромная масса молекул хаотически присаживается на “холодной” стороне нанотрещины и нанотрещина занимает новое положение, при более высокой температуре, отличающейся от прежней на  $\Delta T$  молекулярного слоя, рис. 1.

Можно логически показать, не прибегая к сложным расчетам, что температура поверхности  $T_2$  “холодной” стороны нанотрещины при перескоке слоя молекул с противоположной стороны увеличится лишь на  $\Delta T$  молекулярного слоя, рис. 3.

Действительно, представим полость в равновесных условиях с определенным давлением паров внутри нее. Вбрызнув в нее определенное количество молекул с меньшей кинетической энергией, чем равновесная, другими словами, введя хладагент, мы понизим температуру, которая за счет теплообмена будет повышаться. Напротив, если введем более горячие молекулы, то тем самым повысим температуру, которая стремится к снижению до равновесной. Если введено такое же количество молекул с равновесной энергией, то температура не должна измениться. Во всех трех случаях введение избыточного количества молекул связано с изменением давления в полости, но в последнем случае, приняв, что не происходит присадки молекул на стенки, увеличение давления будет связано не с увеличением температуры, а с увеличением массы газовой фазы,  $\mu: NPV = \mu RT$  (выделено жирным шрифтом). Таким образом, в динамических условиях при смещении нанотрещины на один шаг (рис. 1) новые значения температуры  $T''_2$  и  $T''_1$  увеличатся на  $\Delta T$  нанотрещины (рис. 3):  $T''_2 = T_1, T''_1 = T_1 + \Delta T$ .

#### СТРУКТУРА, НЕПОСРЕДСТВЕННО ПРИЛЕГАЮЩАЯ К “ХОЛОДНОЙ” СТОРОНЕ НАНОТРЕЩИНЫ

Быстрая и хаотичная присадка слоя молекул на “холодной” стороне нанотрещины приведет к сложной, напряженной по своей природе, структуре с образованием значительного количества всевозможных дефектов, пустот, вакансий, дислока-

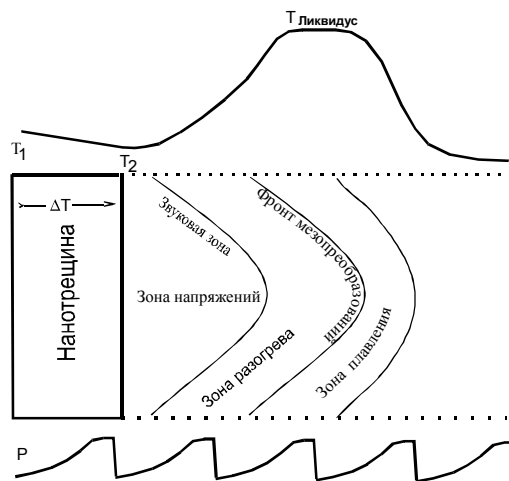


**Рис. 2.** Логарифм давления паров (слева – направо) алюминия, меди, золота, кварца ( $\text{SiO}_2$ ) и корунда ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Давление – в миллиметрах рт. столба. Точки – опытные данные [16], кривые – расчетные данные:

$$\begin{aligned} \lg P_{\text{Al}} &= 8,679 - 1,5259 \cdot 10^4 / T + 3,8009 \cdot 10^5 / T^2 - 3,8774 \cdot 10^8 / T^3 - \\ & 1,1895 \cdot 10^6 / T^4, \lg P_{\text{Cu}} = 5,6568 - 4,850 \cdot 10^3 / T - 1,3833 \cdot 10^7 / \\ & T^2 + 5,016 \cdot 10^9 / T^3 + 1,3808 \cdot 10^7 / T^4, \lg P_{\text{Au}} = 8,0631 - \\ & 1,5183 \cdot 10^4 / T - 3,3063 \cdot 10^6 / T^2 + 9,4917 \cdot 10^8 / T^3 + 2,4616 \cdot 10^6 / \\ & T^4, \lg P_{\text{SiO}_2} = 13,0721 - 2,4099 \cdot 10^4 / T - 5,0487 \cdot 10^6 / T^2 + \\ & 3,6432 \cdot 10^9 / T^3 + 6,5387 \cdot 10^6 / T^4, \lg P_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 11,2949 - 2,7311 \cdot 10^4 / \\ & T - 1,8957 \cdot 10^4 / T^2 + 2,0563 \cdot 10^7 / T^3 + 3,0508 \cdot 10^4 / T^4. \end{aligned}$$

ций, образование которых в нормальных условиях требует затраты энергии. Их концентрация должна быть намного больше равновесной, такой, чтобы их энергии хватило бы не только для подплавления вещества, но и на преобразование энергии в виде звуковых волн. Естественно, что происходит это должно за счет кинетической энергии ударных молекул “горячей” стороны нанотрещины. Концентрация дефектов будет наибольшей в первых слоях нанотрещины. Поэтому быстрая аннигиляция значительного избытка дефектов (напоминающая, образно говоря, мгновенную кристаллизацию из сильно пересыщенного раствора) приведет к преобразованию энергии в основном в звуковые колебания и началу теплового разогрева. Этот слой, непосредственно прилегающий к “холодному” краю нанотрещины, можно с полным основанием назвать “звуковым”. Дальнейшее преобразование слоя, который уже окажется вдали от края трещины (напомним, что трещина “перемещается”, а перемещенный объем вещества остается на месте, смещаясь лишь на ширину нанотрещины) будет сопровождаться (тепловые волны) дальнейшим выделением тепла от оставшихся в избытке против равновесного дефектов: разрядка напряженных зон, уменьшение дислокаций, сток вакансий до их равновесного количества. Поэтому эту зону можно на-



**Рис. 3.** Структура зоны преобразований.

Изменение температуры полосы по мере продвижения нанотрещины. Структура зоны преобразований за нанотрещиной: напряженная зона с высокой концентрацией дефектов (дислокации, пустоты, вакансии), состоящая условно из двух подзон – упругих колебаний (звуковая зона) и разогрева, – не имеющих четких границ и взаимно проникающих друг в друга; узкая полоска преобразования вещества при достижении ликвидусных температур. Нижняя кривая – пульсации давления в объеме движущейся трещины.

звать зоной разогрева вещества и перехода ее в более узкую зону подплавления вещества, когда температура достигнет солидусных значений, рис. 3.

### ПОДПЛАВЛЕНИЕ ВЕЩЕСТВА НА “ХОЛОДНОЙ” СТОРОНЕ НАНОТРЕЩИНЫ

Достаточно ли кинетической энергии для переплавления вещества на “холодной” стороне нанотрещины, передаваемой с перемещаемым слоем молекул, когда температура должна повысится до температуры солидуса? Энергия на “горячей” стороне нанотрещины не должна превышать или быть равной энергии расплавленного вещества, иначе расплав, попросту говоря, заполнит трещину, на чем и закончится преобразование. Поэтому можно оценить минимальную температуру мезопреобразований, исходя из затрат энергии, необходимой для преобразования вещества.

Определить, насколько температура “горячей” стороны должна быть ниже температуры солидуса, можно следующим образом. Пусть  $T_1$  – температура начала преобразований (температура “горячей” стороны),  $T_s$  – температура солидуса. Количество тепловой энергии  $Q$  от температуры  $T_1$  до температуры  $T_s$  определится как  $Q = -\Delta H = \int_{T_1}^{T_s} C_p dT$ , где  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении. Равенство полной кинетической энергии ( $W_p = 0$ ) и тепловой энергии

Таблица 3. Минимальная температура мезопреобразований некоторых веществ.

*Примечание.* Кварц рассчитан с учетом фазовых переходов, а мусковит – с учетом дегидратации при температуре 1000К.  $T_S$  – температура плавления,  $H$  – энтальпия, приходящаяся на один атом,  $W_K$  – кинетическая энергия. Для сложных веществ расчет проводился на усредненный размер атома. \*) Диопсид – ксенокристалл в граните.

даст значение минимальной температуры  $T_{\min} = T_1$ , при которой начинаются мезопреобразования (табл. 3).

Каково должно быть количество дефектов, энергии которых достаточно, чтобы достичь необходимой минимальной температуры? Рассмотрим это на примере вакансий и дислокаций как наиболее распространенных дефектов кристаллической решетки. Энергия образования одной вакансии в меди  $U_v \approx 1,5 \cdot 10^{-17}$  (Н м). Концентрация вакансий  $C_v = \exp(U_v / kT)$ , где  $k$  – постоянная Больцмана. Определим энергию образования дислокации, исходя из кинетической энергии дислокации единичной длины  $W_{kd} = \rho b^2 v^2 / 2$ , где  $\rho$  – плотность вещества,  $b$  – вектор Бюргерса. Произведение  $\rho b^2$  представляет собой “массу” дислокации на единицу длины. Дислокация движется в кристалле, теряет свою кинетическую энергию, которая при повышенных температурах переходит в энергию упругих и тепловых волн. Сокращение дислокационной линии на длину  $\Delta L$  приведет к выделению энергии  $W_d$  на величину  $W_d = \Delta L G b^2$ , а на единичную длину, то есть на толщину перемещенного слоя,  $W_d = G b^3$ . Такая величина энергии приблизительно равна выделяемой энергии аннигилирующей вакансии, то есть  $G b^3 \approx U_v$ . Отсюда  $G = U_v / b^3 \approx 1,5 \cdot 10^{-17} / (3 \cdot 10^{-10})^3 = 1,6 \cdot 10^{12}$  Н/м<sup>2</sup>, что близко к табличным данным. Общее число вакансий и дислокаций в слое  $n_{vd} = W_k \cdot (n_a / (a U_v) + n_a / ((1-a) G b^3))$ , где  $a$  – доля вакансий из общего числа вакансий и дислокаций,  $n_a$  – число молекул в перемещаемом слое. Общая концентрация вакансий и дислокаций составит приблизительно  $C_{vd} = \exp(U/W_k) \approx \exp(1,5 \cdot 10^{-17} / 1,9 \cdot 10^{-18}) = 2683$ , что превышает равновесную приблизительно в 300 и более раз. Рас-

стояние между вакансиями составит около  $9 \cdot 10^{-6}$  см, и на единицу длины одна вакансия приходится на 25–50 атомов. Кинетическая энергия дислокаций, так и вакансий перейдет в энергию упругих и тепловых волн. В таблице 3 приведены минимальные температуры, при которых начинаются мезопреобразования для металлов и минералов без приложения внешних нагрузок.

#### ОЦЕНКА ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР В МАТРИЦЕ

Можно оценить и градиент температур, который существует в матрице, начиная от минимальной температуры, при которой осуществляются мезопреобразования, и до температуры ликвидуса. Разница  $\Delta Q$  от минимальной температуры мезопреобразований до температуры солидуса в расчете на одну молекулу составит  $\Delta Q / N$ , где  $N$  – число Авогадро. Тогда, используя формулу из работы [5]:

$$\Delta T = \Delta Q \chi E \tau_0^2 / (N 4\pi^2 \rho l L k), \quad (4)$$

где  $\chi$  – числовая функция,  $E$  – модуль упругости,  $\tau_0$  – частота колебаний атома,  $\rho$  – плотность материала,  $l$  – линейный размер молекулы,  $L$  – единица длины, вдоль которой полностью проходит тепловая энергия  $\Delta Q$  по сечению  $b^2$  и длиной в 1 см,  $k$  – постоянная Больцмана.

Подставляя значения  $\Delta Q = 15,14$  Ккал/моль,  $\chi = 0,4172$ ,  $\tau_0 = 5,7682 \cdot 10^{-13}$  сек, (табл. 1),  $E = 4 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $N = 6,023 \cdot 10^{23}$ ,  $\rho = 8,91$  г/см<sup>3</sup>,  $l = 3 \cdot 10^{-8}$  см,  $k = 3,298 \cdot 10^{-24}$  кал/К, определим  $\Delta T = 4 \cdot 10^{-5}$  К на 1 см длины или  $1,32 \cdot 10^{-13}$  К на ширину нанотрещины в 1 Бюргерс.

Отметим, что градиент температур будет значительно больше, так как не учитывались потери тепла в окружающую среду (воздух). Поэтому можно счи-

тать, что это минимальный градиент, при котором происходят преобразования меди.

Для силикатных минералов коэффициент теплопроводности примерно на два порядка меньше. Но количество тепла  $\Delta Q$  на порядок–два больше. Поэтому градиент температур будет находиться в пределах  $1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-4}$  градуса на сантиметр. Так для  $\text{SiO}_2$  в составе гранита (табл. 3) от температуры 1170 К до 1300 К  $\Delta Q = 2275$  кал,  $\chi \approx 0,6$ ,  $\tau_0 \approx 4,5 \cdot 10^{-13}$  сек,  $E \approx 5 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho = 2,36$  г/см<sup>3</sup>,  $l \approx 2,08$  см,  $k = 3,298 \cdot 10^{-24}$  кал/К, градиент температур составит  $3,6 \cdot 10^{-4}$  К/см или  $7,2 \cdot 10^{-13}$  К для нанотрещины шириной  $2b$ . В целом для гранита  $\Delta T \approx 3,85 \cdot 10^{-4}$  К/см. В этом плане с учетом меньшего коэффициента теплопроводности и большего градиента температур мезопреобразования в породах предпочтительнее, чем мезопреобразования в металлах, так как создают больший градиент температур между “горячей” и “холодной” стороной нанотрещины, но требуют больших температур. В отличие от металлов в природной системе может происходить вынос тепла изнутри системы за счет диффузии летучих. Поэтому градиент температур в самой системе может быть значительно меньше, тогда как на границе с системой может наблюдаться повышенный градиент температур. Под системой в данном случае подразумевается магматический очаг, а его окружение ограничено в пределах изотермы минимальной температуры мезопреобразований (табл. 3). В областях со значительным выносом тепла вероятные образование месторождений полезных ископаемых.

#### МЕЗОПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПОРОДАХ

Отличие металлов от силикатных минералов заключается в хрупкости последних. Поэтому полоса мезопреобразований в породах может ограничиться разрушением минералов с частичным подплавлением (псевдотахиты?) или даже без подплавления. Наличие нанотрещин в силикатных минералах связано с распадом радиоактивных веществ (треки), с проявлением динамических подвижек (трещины), наличия пустот и твердых включений, температурный коэффициент расширения которых отличен от такового матрицы. Наиболее благоприятным для мелких трещин является межзерновой цемент с его включениями, пустотами и т.д. Формируясь из последних порций расплава, цемент содержит повышенные количества кремнезема и потому наиболее подвержен мезопреобразованиям.

Проверим, возможны ли мезопреобразования в породах. Так, для сухого гранита от 800К (то есть температуры, меньше минимальной, необхо-

димой для мезопреобразований, таблица 3) до температуры плавления, 1250К, количество энергии, требующееся для его переплавления, составляет 103 Ккал/моль, тогда как, исходя из полной кинетической энергии перемещаемого слоя молекул, –  $Q \approx 80$  Ккал/моль, то есть цифры одного порядка. Все дело в наличии роя нанотрещин. Их легче получить в металлах, чем в кристаллах, за одним исключением, которым является межзерновой цемент. По своей природе он изначально может содержать законсервированные нанотрещины. Поэтому любые внешние воздействия могут привести к мезопреобразованиям по границам кристаллов, по границам пород. Единственное отличие – он имеет больший модуль упругости, наподобие стеклам, поэтому выделяемой энергии недостаточно для полного переплавления цемента, но достаточно для его разрушения, превращения в подобие “песочка” с отдельными глобулами стеклообразной фазы. Такое нарушение прочности пород может привести к прорыву магмы из магматического очага, землетрясениям, образованию даек, передвижению слоев в напряженных зонах земной коры и другим подобным следствиям [4]. В нашем случае, при  $m = 6 \cdot 10^{-22}$  (г), модуле Юнга для межзернового цемента  $E = 5 \cdot 10^{10}$  (Н/м<sup>2</sup>), для молекулы  $\tau_0 \approx 10^{-12}$  сек и  $\chi \approx 0,1$  (таблица 1, 3),  $L$  составит 4,73 км/с, что соизмеримо со скоростью сейсмоволн. Можно поступить иным образом, учитывая, что для горных пород, в отличие от металлов, не обязательно достижение предплавильных температур при мезопреобразованиях, а достаточно их разрушения, то с полным основанием можно заменить в формуле (2) модуль упругости на значение критического напряжения,  $\sigma$ , при котором происходит разрушение пород, но  $\sigma$  несколько меньше модуля упругости и намного меньше (на несколько порядков) при фазовых превращениях минералов [12]. Так, для гранита в отсутствие видимых нарушений при 800 К  $\sigma \approx 1,28 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup> [2]. Подставляя в формулу (2) вместо модуля Юнга значение критического напряжения  $\sigma$ , получим скорость, равную 3,2 км/с, то есть того же самого порядка.

При наличии магматического очага расширение вмещающих пород способствует росту и раскрытию макротрещин в направлении от магматического очага. Мезопреобразования, напротив, развиваются на некотором расстоянии в направлении магматического очага. В этом их принципиальное различие.

В конечном итоге мезопреобразования порождают макротрещину, заполненную разрушенным материалом, и уменьшают прочность пород. Подтверждением предварительного развития мезопреобразо-

ваний служат работы [13, 18], исследующие развитие Срединно-Атлантического хребта на основании геологических и минералогических данных. Авторы пришли к выводу, что распространение срединно-океанического рифта шло вслед за плюмом, которые были первоначально разьединены, и рифт скачкообразно двигался по направлению к плюму (продвижение нанотрещин—образование продольных трещин—ослабление прочности пород—образование рифта). Обобщающая работа по этому вопросу представлена на сайте В. Jordan, J. Winter, R. Hazlett, 2003.

Таким образом, процесс мезопреобразований состоит из следующих последовательных и взаимосвязанных действий:

а) При температурах, меньше начальных минимальных, необходимо внешнее силовое воздействие на систему для локального проявления мезопреобразований. При достижении начальной минимальной температуры нанотрещина, полностью находящаяся в напряженной области, способна без дополнительной внешней энергии подвергнуться мезопреобразованиям. При первом толчке, когда  $\Delta T$  при первоначальном разогреве больше, чем в установившемся динамическом равновесии, разрядка напряженной области вокруг нанотрещины переводит основную массу слоя молекул “горячей” стороны в газовую фазу при температуре  $T_1$ . С этого момента  $\Delta T$  трещи-

ны значительно снижается, и движение нанотрещины происходит в сторону источника тепла. Отметим, что чем больше  $\Delta T$  трещины, тем меньше требуется тепловых или механических усилий для возбуждения молекулярного слоя;

б) Кинетическая энергия слоя молекул при выходе в газовую фазу равна или больше кинетической энергии молекул в полости нанотрещины при равновесных условиях. Но ее количество на несколько порядков больше равновесного, что обеспечивается дополнительными затратами внешних (по отношению к полости, — напряженная зона вокруг нанотрещины) источников энергии. При этом температура в полости трещины остается равной температуре окружающей среды;

в) Изменение количества молекул в полости трещины при той же температуре  $T_1$  приведет к повышению давления в объеме трещины:  $P/P_{\text{равн.}} = n/n_{\text{равн.}}$ , т.е. во столько раз, во сколько  $n$  молекул превышает  $n_{\text{равн.}}$  (рис. 2, 3). Присадка же слоя молекул на “холодной” стороне трещины приведет к пульсации давления в объеме трещины с частотой, равной или кратной частоте выхода в газовую фазу молекул “горячей” стороны нанотрещины. Учитывая распределение Максвелла по скоростям молекул, пульсация давления будет меньше, то есть  $P/P_{\text{равн.}} \ll n/n_{\text{равн.}}$ ;

г) При хаотичной присадке молекул на “холодной” стороне нанотрещины происходит преобразование избытка механической энергии (аннигиляция нанного больших, чем равновесные концентрации вакансий и дислокаций) с переходом в звуковую (с той же частотой) и тепловую энергии, ведущее в конечном итоге к полосе мезопреобразований, остающейся позади “движения” нанотрещины;

д) Дальнейшее движение нанотрещины после первого “толчка” обеспечивается за счет резонансных частот, в том числе пульсаций давления и упругих колебаний, частично передаваемых с “холодной” стороны трещины;

е) О том, что именно трещины шириной в первые единицы Бюргера являются источником мезопреобразований, можно судить по некоторым характерным чертам, которые можно ожидать при мезопреобразованиях в таких случаях. При значительном  $\Delta T$ , которое в момент нагрева может оказаться наибольшим, и если трещина расположена недалеко от края образца, работающего как “холодильник”, должна наблюдаться определенная структура этой области (рис. 4). Поэтому большинство мезополос начинается от края образца, служащего своеобразным холодильником. Но в этом случае между краем образца и началом полосы мезопреобразований должна оста-

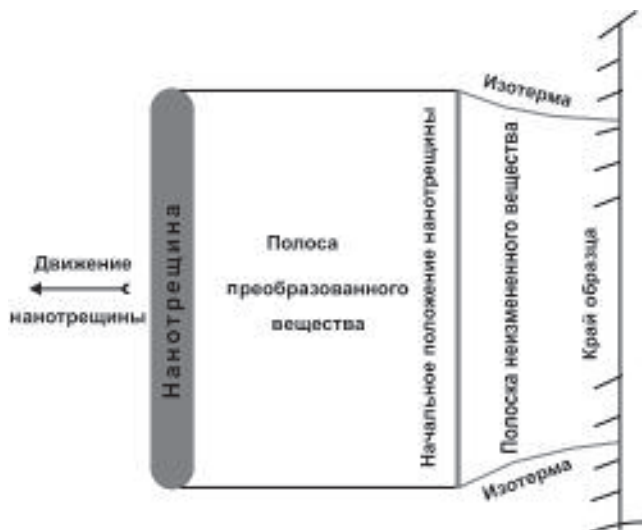


Рис. 4. Движение нанотрещины от края образца.

От края образца (выполняющего роль холодильника) до начального положения нанотрещины (жирная линия) остается узкая полоска неизменного вещества. От начального положения до движущейся нанотрещины (темный цвет) остается полоса преобразованного вещества. Перемещение нанотрещины показано стрелкой в сторону источника тепла. В момент нагрева образца температуры края образца и вещества, соответствующего начальному положению трещины, могут различаться в 4–6 раз, таблица 2.



ваться тонкая полоска неизменного вещества. Если учесть, что для металлов должно быть, в отличие от силикатных минералов, плавление вещества, хотя бы частичное, то, включив скрытую теплоту плавления металлов в полном объеме, получим для Al, Cu и Au, что кинетической энергии перемещаемых молекул недостаточно для полного плавления этих металлов (в противном случае потребуется увеличить плотность вакансий и дислокаций – одна вакансия или дислокация будет приходиться на 3–10 атомов вещества). Поэтому вторым признаком при частичном плавлении будет более рыхлая структура полосы мезопреобразований и небольшое возвышение полосы над общей поверхностью металлов, возможно с небольшими наплывами (стеклообразное состояние металла в преобразованной полосе). Так, включение лишь половины скрытой теплоты плавления увеличивает минимальную температуру преобразований этих металлов и уменьшает разницу между температурой плавления и минимальной температурой,  $\Delta T$ , которая для Al составит ~ 40, для Cu и Au ~ 100 градусов (сравните данные с таблицей 3). Поэтому для алюминия маловероятны или затруднены полосообразные преобразования по сравнению с медью и золотом, если принять во внимание “отпотевание” металла (наличие пленки жидкого металла по границам зерен ниже температуры плавления на несколько градусов) и затраты энергии на упругие колебания (звук). Это различие в поведении алюминия может явиться третьим дополнительным признаком, при котором мезопреобразование, раз начавшись, может завершиться на границе зерна, создавая локальное вспучивание [11].

Таким образом, для мезопреобразований необходимы три условия: рой микротрещин, небольшой градиент температур, а спусковым крючком может служить тепловой удар с механическими преобразованиями и(или) ангармоничность колебаний молекул левой и правой стороны нанотрещины или ударные (шоковые) волны. Напомним одну важную особенность: полоса мезопреобразований движется в область повышенных температур.

Мезопреобразования в геологии могут быть обнаружены только по косвенным признакам.

1) Находки пелитоподобных образований с возможными оплавленными или полуоплавленными включениями (образование последних при мезопреобразованиях связано с меньшими температурами плавления) в узких (в основном межзерновых) полосах. Например, псевдотахилиты, представляющие собой узкие полоски и линзы в милонитах тонкозернистого стекловатого облика, с криптокристалличес-

кой структурой, тонко измельченного материала без следов настоящего переплавления (по данным рентгенометрического анализа). Возможно, что и процессам милонитизации предшествовали мезопреобразования, циклически повторяясь.

2) Вступления (малая диссипация энергии) сейсмических волн на сейсмограммах землетрясений в областях повышенных напряжений (механическое возбуждение мезопреобразований или изменение теплового режима), и в зависимости от направления распространения мезопреобразований они могут иметь как отрицательные, так и положительные знаки (по принятой в геофизике терминологии). Вступлений может быть несколько, а может и не быть вовсе. Судя по длительности вступлений продольных волн (0,03–0,01 и менее), расстояние от начала мезопреобразований до источника возбуждений (зоны напряжений горных пород, магматический очаг, технические взрывы) может составлять 50–300 и более метров.

3) Петлеобразный характер источника последовательных землетрясений при наличии расплавленного батолита, его изотермные поверхности являются эллипсоидально-грушевидными.

4) Ступенчатый подъем магмы при извержении вулканов (тепловой удар по скоплению нанотрещин) при быстром поднятии магмы и очередной остановке.

5) Спровоцированные техническими взрывами землетрясения в напряженных зонах земной коры или разрядка аккумулированной на микроуровне энергии с высвобождением в виде упругих волн [6]. Интересно отметить, что при технических взрывах в напряженном горном массиве происходит значительное высвобождение энергии в виде горных ударов, толчков, зафиксированных по датчикам акустической и электромагнитной эмиссии на границах с разнородными средами (макроуровень). До горного удара на микроуровне наблюдаются наложенные друг на друга (?) вступления (локальные мезопреобразования?), ведущие к ослаблению прочности между напряженными блоками. Впервые такие наблюдения проведены на Таштагальском руднике [1].

6) Образование даек как в областях растяжения, так и в областях сжатия.

7) Образование алмазонасных трубок и даек, когда источник находится на большой глубине [4].

8) Для пачки пород разрушение межплоскостной границы приведет к своеобразной смазке между слоями пород, уменьшая коэффициент трения, что при наличии внешней продольной силы, приложенной к одному из слоев, вызовет перемещение слоя относительно других на значительные расстояния.

Здесь же отметим, что в напряженных зонах большой протяженности необязательно распространение мезопреобразований в сторону источника тепла, но обязательно распространение с целью наибольшего уменьшения напряженного состояния области, так как последнее энергетически выгодно при стремлении к равновесному состоянию.

9) При землетрясениях обычные механические разрушения и мезопреобразования с временным опережением могут работать совместно-последовательно (циклически), создавая зоны разломов, глубинных кимберлитовых трубок и даек. Одной из причин может быть коллапс вмещающих пород при кристаллизации магматической камеры на глубинах 20–40 км, более сильный для основных, чем кислых пород, и нарушение прочности вмещающих пород на глубинах 3–10 км ввиду появления сверхдавления [2]. К этим же отметкам приурочено большинство землетрясений.

Из рассмотрения этих проявлений с очевидностью следует, что и тепловой удар, и механические искажения решетки, и шок-волны являются лишь затравочными средствами, способствующими установлению резонансных частот и меняющими ангармоничное поведение плоскостей трещины таким образом, что будут осуществляться мезопреобразования (колебания в противофазе и резонанс?). Мезоангармоничное поведение будет поддерживаться неизменным в однородной среде и может быть прекращено (что необязательно) на границах перехода в другую среду или с плавным изменением состава и свойств среды.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мезопреобразования в геологии, как и в общем случае, представляют собой поперечное смещение нанотрещин при достижении определенных температур для каждого вещества. Скорость перемещения составляет несколько сот метров в секунду.

Мезопреобразования предваряют многие геологические события и способствуют их проявлению по причине резкого понижения прочности пород. В общем случае полоса мезопреобразований перемещается в сторону источника тепла. Отличие от обычных трещин заключается в том, что обычные трещины развиваются в продольную сторону в направлении вершины трещины, где, как известно, расположена область наибольших напряжений, и примерно с той же скоростью, как и мезопреобразования, но направление развития определяется продольным пространственным расположением самой трещины.

В период развития обычных трещин и нанотрещин в полости первых вне зависимости от параметров всегда осуществляется броуновское движение паров материала, тогда как в полости нанотрещин оно находится в зачаточном состоянии. Исключение составляют лишь открытые с поверхности нанотрещины, в самой верхней открытой части которых возникающий крутильный момент (из-за неоднородности связей молекул в матрице и выходящей в полость молекулы) может привести к образованию наблюдаемых в опытах двойных спиралей (ламеллей), при температуре, меньше начальной минимальной, и внешней нагрузке, часто наблюдаемых в опытах [7], что быстро приводит к закрытию трещины с поверхности и изменению движения по причине небольшого изменения наклона нанотрещины.

Отметим, что каждое из рассматриваемых в статье положений представляет собой довольно сложную теоретическую задачу. Например, какой вклад в резонансные частоты дальнейших преобразований будут вносить пульсация давления внутри полости и упругие колебания, передаваемые с “холодной” стороны трещины, для возбуждения нового слоя молекул, или когда трещину можно рассматривать как нанотрещину, другими словами, способную к поперечному движению, к образованию мезополосы по достижении определенных температур и без внешних механических нагрузок, или какова должна быть ширина нанотрещины, чтобы рассматривать давление в полости как однонаправленное, без броуновского движения. Все это требует глубокой теоретической проработки не только с позиций молекулярной физики, физики твердого тела и сплошных сред, но и геофизики и петрографии. Поэтому на данном этапе исследований полученные оценки достаточны для общего понимания процесса и описания мезопреобразований в горных породах.

Автор благодарит В.С. Шкодзинского и Б.М. Козьмина за просмотр рукописи и сделанные замечания.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалько А. А., Суржиков А. П., Хорсов Н. Н., Яворович Л. В., Клишко В. К., Штирц В. А., Шипеев О. В. Наблюдение изменений напряженного состояния массива горных пород после массового взрыва по параметрам магнитной эмиссии // Физическая мезомеханика. 2004. № 7. Спец. вып., ч. 2. С. 253–256.
2. Гамянин Г. Н., Горячев Н. А. и др. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидах северо-востока Азии. Магадан: МПО СВНЦ ДВО РАН, 2003. 196 с.
3. Дерюгин Е. Е., Панин В. Е. Мезомеханика формирования полосовых структур на мезо- и макромасштабном уровнях

- // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец.вып., ч.1. С. 101–104.
4. Диман Е. Н., Зельтман Р. Влияние давления на перенос расплавов к верхним уровням земной коры // Золотое оружие и гранитоидный магматизм Северной Пацифики. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2001. С. 230–239.
  5. Диман Е. Н. Три мезоуровня в геологии // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец.вып., ч. 1. С. 120–123.
  6. Лавриков С. В., Ревуженко А. Ф. Структурно-неоднородный горный массив как среда с внутренними источниками и стоками энергии. 2004
  7. Панин А. В., Шугуров А. Р., Шрайбер Ю., Оскомов К.В. Особенности пластической деформации и разрушения тонких металлических пленок при термическом и механическом нагружении // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец.вып., ч. 1. С. 142–145.
  8. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Псахье С. Г. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия развития, проблемы и перспективы // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец. вып., ч. 1. С. 25–40
  9. Панин С. В. Закономерности пластической деформации и разрушения на мезоуровне материалов с покрытиями и поверхностным упрочнением // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец.вып., ч. 1. С. 109–112.
  10. Ружич В. В., Псахье С. Г., Смекалин О. П., Шилко Е. В., Астафуров С. Ф. Изучение влияния водонасыщения и вибраций на режим смещения в зонах разломов // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец.вып., ч. 2. С. 257–260.
  11. Шугуров А. Р. Эволюция рельефа поверхностей тонких пленок в процессе их формирования и при внешних воздействиях. Фрактальный анализ: Дис... канд. физ.-мат. наук. Томск: ИФПМ СО РАН, 2001. 179 с.
  12. Diman E. N. Calculation of rupture strength of country rock, 2001, Computer-aided design of advanced materials and technologies. VI International Conference. Tomsk: SB RUS, 2001. P. 31.
  13. Hardarson S., Fitton J.G. Mechanism of crustal accretion in Iceland // Geology. 1997. V. 25. P. 1043–1046.
  14. Koval A.V., Panin S.V., Bondar M.P. Investigation of the mesoscopic plastic deformation of copper specimens formed by explosive/collapsing and double-stage extrusion // Mesomechanics: foundations and applications (International Workshop), Tomsk, Russia: SB RUS, 2001. P. 91.
  15. Makarov P.V. Physical mesomechanics approach for simulation of deformation and fracture processes // International workshop, Mesomechanics foundations and applications. Tomsk, Russia: SB RUS, 2001. P. 31.
  16. Mineral Physics & Crystallography. A Handbook of Physical Constants, 1995, American Geophysical Union, Washington, Editor Thomas J.Ahrens, Reference Shelf 2. P. 354.
  17. Panin E.V. Physical mesomechanics as the basis of models for computer-aided-design of advanced materials // VI International Conference: Computer-aided design of advanced materials and technologies, Tomsk, SB RUS, 2001. P. 21.
  18. Saemundsson K. Outline of the geology of Iceland // Jökull. 1979. V. 29. P. 7–28.

Поступила в редакцию 14 августа 2004 г.

Рекомендована к печати Н.А. Горячевым

*Ye.N. Diman*

### Mesotransformations as the cause of geological restructuring

Consideration is given to the problems of mesotransformations in geology. A new hypothesis was offered that both nanocrack swarms and a small temperature gradient are the cause of mesotransformations in rocks (Diman, 2004). The movement of mesotransformations occurs by fictitious conventional propagation of the nanocrack into the domain of high temperature. Mesotransformations precede and further many geological events, namely strip-like violation of rock strength, earthquakes, formation of dikes and pipes, including diamond pipes and dikes, and longitudinal and transverse dislocation of crystal layers. The mesotransformations rate reaches several hundreds of meters per second.

The minimum temperatures for substances are determined at which mesotransformations can begin without outward influence. An inference is made that mesotransformations are widely distributed in the rocks of the earth's crust.

This paper also offers a structure of the mesotransformations zone, and differences in mesotransformations are considered for both metals and silicate rocks (as exemplified by granite). Sufficient features are adduced for the mesotransformations as the product of the transverse motion of nanocracks.

**Key words:** mesotransformations, nanocracks, temperature gradient, rocks.