

ОТ ЕСТЕСТВЕННОЙ КУСКОВАТОСТИ В ПРИРОДЕ К МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

В статье дана попытка схематичного представления о разрушении горных пород путем гипотетического восстановления структуры породы при ее мысленной сборке из отдельных фракций всего гранулометрического состава.

In work attempt to give schematical representation about destruction of rocks is given by hypothetical restoration of structure of breed at its mental assembly from separate fractions of all granulometric structure.

Впервые мысль о существовании преимущественных кусковатостей горных пород в природе была высказана академиком М.А.Садовским [7]. Гранулометрический анализ коры выветривания Забайкалья и дробления горной породы подземными взрывами, распределение частиц торфа, измельченных различными способами, и даже данные о блоках земной коры различных исследователей подтверждают гипотезу М.А.Садовского о существовании иерархической последовательности преимущественных размеров. В настоящее время эта гипотеза, благодаря работам многочисленных его последователей, на пути общепризнанной теории. М.А.Садовский и др. дают соотношение величины соседних преимущественных размеров от 2 до 5. Авторы при этом предполагают, что возникновение дискретной иерархии преимущественных размеров объясняется тем, что разрушение на разных масштабных уровнях вызывается процессами и характером изменения свойств самого твердого тела. Таким образом, естественная кусковатость горных пород по М.А.Садовскому – следствие гомотетичного (подобного) макропроявления внутренних структур, сопровождающих процесс разрушения. Гипотеза о возможности гомотетичного макропроявления закономерностей микромира в виде определен-

ных геометрических параметров макроявлений блестяще подтверждена учеными из ИГД СО РАН акад. РАН М.В.Курленей и чл.-кор. РАН А.Н.Опариным [3]. Остановимся подробнее на сути доказательства. Геометрические параметры явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг горных выработок описываются формулами следующего вида:

$$r_i = r_0(\sqrt{2})^i \text{ и } \Delta r_i = (0,05 - 0,13)r_i,$$

где r_0 – радиус выработки; r_i – радиус i -й зоны дезинтеграции, $i = 1, 2, 3, \dots$; Δr_i – ширина зоны дезинтеграции.

Это со стороны макроявлений в массиве горных пород. С другой стороны, выполненный учеными анализ современных экспериментальных данных в области ядерной физики и геохимии по атомно-ионным радиусам химических элементов таблицы Менделеева, позволяет заключить о существовании неизвестного ранее закона сопряженности этих величин, т.е. атомно-ионных радиусов, по модулю $(\sqrt{2})^i$, $i = 0, +1, +2, \dots$; т.е. для каждого химического элемента атомно-ионные радиусы r_i (i – валентные орбиты) соотносятся между собой по масштабному фактору $\sqrt{2}$ в отношениях $r_i = r_0(\sqrt{2})^i$, $\Delta r_i = \pm 0,065r_i$, где r_0 – радиусы

невозбужденных нейтральных атомов; Δr_i – зоны неопределенности радиуса r_i . Из приведенного факта видно, что энергетическая структура атомов, входящих в состав минералов горных пород, самовоспроизводится как зона дезинтеграции горных пород вокруг горных выработок, а их геометрические параметры описываются формулами одинакового вида.

Структурные уровни микромира самовоспроизводятся с коэффициентом, равным $\sqrt{2}$, следовательно, и коэффициент вложения геоблоков для смежных иерархических уровней тоже должен быть равен $\sqrt{2}$. Однако М.А.Садовский и его последователи определяют коэффициент вложения геоблоков в широких пределах: от 2 до 5. Такую неопределенность оценки данного коэффициента М.В.Курлени и А.Н.Опарин объясняют как следствие некорректного отнесения того или иного размера блока не в свой иерархический класс и приводят фундаментальный ряд размеров фракций обломочного материала, встречающегося в горной практике, с коэффициентом вложения $\lambda = 2$: 10000; 5000; 2500; 1250; 625; 310; 160; 80; 40; 20; 5; 2,5; 1,5 км; 600; 300; 150; 75; 40; 20; 10; 5; 2,5; 1,2 м; 60; 30; 20; 10 см и т.д.

Таким образом, предположим по аналогии: как явление зональной дезинтеграции есть подобное отражение закона сопряженности атомно-ионных радиусов химических элементов, так и преимущественная кусковатость горных пород есть гомотетичное (подобное) воспроизводство на различных масштабных уровнях структур вещества и энергетических полей микромира. Из приведенных примеров возможно судить о внутренних процессах разрушения горных пород по некоторым устойчиво проявляющимся явлениям макроразрушения, т.е. появляется возможность распутывать «клубок ниток с поверхности». Горняки начали распутывать с середины, и потому с каждым разом приходилось все труднее и труднее. Физики начали поиск в глубине, но, чтобы найти этот конец, необходимо проникать все больше вглубь, что само по себе специфический и трудный процесс. Вследствие этого работа идет с переменным успехом.

Но с другого конца, который лежит у всех на виду, начали распутывать «клубок» только в последнее время. Это, в первую очередь, как уже упоминали, работы академиков М.А.Садовского, М.В.Курлени и их последователей.

Анализ модельных представлений разрушения горных пород показывает, что, в основном, все модели разрушения разработаны исходя из свойств и внутренней структуры самих пород и процессов их разрушения. При этом продукт разрушения и его гранулометрический состав во внимание не принимались.

В статье дана попытка схематичного представления о разрушении горных пород путем гипотетического восстановления структуры породы при ее мысленной сборке из отдельных фракций всего гранулометрического состава. Всем частицам, отделенным от породы, придается гипотетическое свойство занимать свое «материнское» место. Такой подход, естественно, требует определенных знаний о продукте разрушения (обломках пород), полученных при различных способах разрушения. Предположим, что в гранулометрическом составе продуктов разрушения существует информация как об объекте разрушения, так и о причинах, вызвавших это разрушение, подобно тому, как спектры излучения и поглощения атомов или молекул несут информацию о строении и свойствах вещества.

Однако в настоящее время наши знания о продуктах разрушения как о носителях информации о процессах разрушения скудны и мало связаны между собой. Известно, что поверхность кусков разрушения имеет определенную шероховатость и покрыта трещинами разного масштабного уровня. В связи с этим шероховатость кусков обусловлена полиминеральностью породы, кристаллическим строением и другими особенностями структуры горной породы, а микротрещиноватость – остаточными явлениями процесса разрушения.

Смыкание трещин или наоборот их слияние в более крупные при определенных условиях дает представление о поверхностном слое породы как о некой упругой обо-

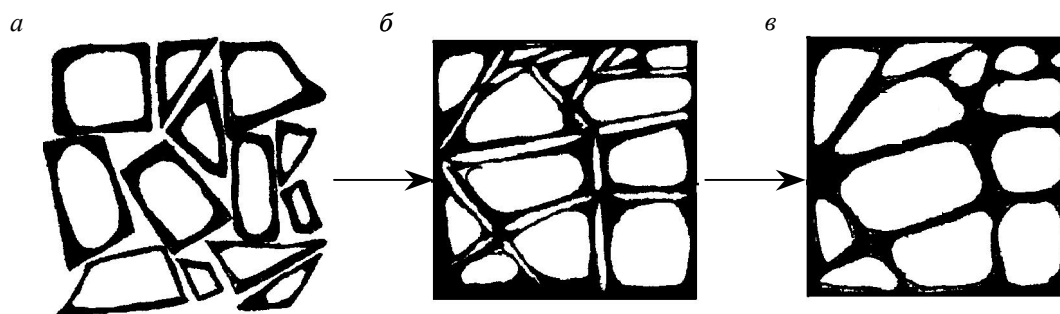


Рис.1. Схема восстановления целостности разрушенной породы: *а* – фрагменты продукта разрушения, представленные как твердое тело в упругой оболочке; *б* – начало консолидации продуктов разрушения в цельный кусок; *в* – восстановление целостности куска с образованием отдельных фрагментов

лочке, которая может накапливать и отдавать энергию. Таким образом, любой фрагмент гранулометрического состава продуктов разрушения можно представить как округлое плотное твердое тело, имеющее менее плотную и упругую оболочку, по форме и размерам совпадающей с размерами и формой этих фракций (рис.1, *а*).

По своей форме фракции могут быть и остроугольными. Это свидетельствует о том, что разрушение происходило без образования значительных зон предразрушения. При достаточной ширине дефектной зоны на вершине острых углов наблюдается большая концентрация дефектов, что ведет к образованию мельчайших, пылеватых частиц, в результате чего угол затупляется и фракции оказываются более-менее округлыми. Известно, чем меньше кусок породы, тем он прочнее, т.е. можно полагать, что крупные куски содержат и более масштабные трещины и другие дефекты в этой упругой оболочке. Более того, можно утверждать, что все эти дефекты в теле в момент разрушения были критического размера, т.е. масштабнее. Разрушение горных пород представляет собой процесс образования отдельных кусков, обратный процесс консолидации продуктов разрушения в первоначальный кусок в природе еще никто не наблюдал. Однако можно мысленно представить этот процесс, придав всем фракциям свойство занимать свое «материнское» место в цельном куске. Рассмотрим случай реконструкции первоначальной структуры разрушенной породы, когда все куски ост-

роугольны. Тогда в начальной стадии консолидации все куски будут контактировать по граням вершин многогранных углов, так как (рис.1, *б*) последние имеют наибольшее разрыхление. По плоским и сферическим поверхностям останутся щели, и все куски сохраняются на этой стадии как отдельная фракция. При дальнейшем продвижении кусков к материнскому гнезду за счет сил межмолекулярного притяжения поверхностные слои местами сольются и станут сплошными, но с более крупными дефектами, т.е. все микротрещины увеличатся и возникнут новые дефекты. Дальнейшее продвижение кусков способствует превращению щелей в магистральные трещины, которые затем соединяются в микротрещины. Это приводит к образованию между двумя кусками общего сплошного, но дефектного слоя. Благодаря этому, все куски окаймляются дефектной «оболочкой» критической величины и трансформируются во фрагменты (рис.1, *в*), целостность куска восстанавливается. Продолжение мысленного эксперимента приводит к деградации «оболочек» и консолидации фрагментов. При этом идут процессы уплотнения «оболочек» и слияния фрагментов в более крупные, в результате которых восстанавливается исходная плотность куска породы (рис.2, *б*). При этом дефекты разуплотненного слоя более равномерно распределяются в объеме куска. Сконцентрированные дефекты сохраняются, главным образом, по вершинам многогранных углов, как очаги разрушения 3. Мысленное восстановление структуры породы

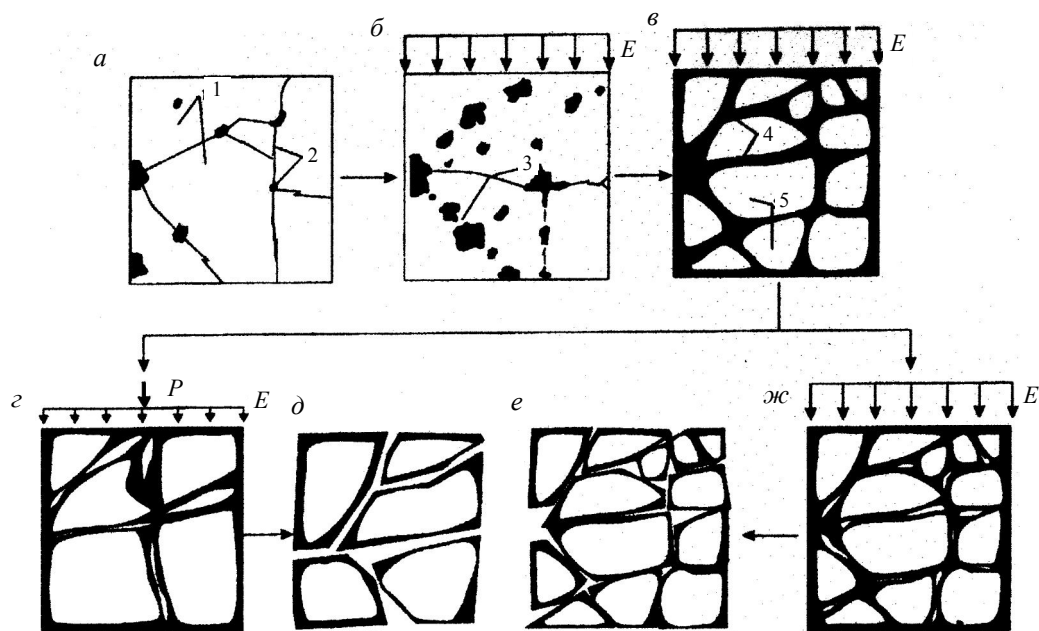


Рис.2. Модельное представление о разрушении горных пород: *а* – исходная структура породы; *б* – образование очагов разрушения в объеме породы от внешней энергии; *в* – структура предразрушенной породы (фрагментация); *г* и *жс* – разрушение породы при дополнительном локальном и объемном приложении нагрузок соответственно; *д* и *е* – продукты разрушения при комбинированном и объемном приложении нагрузок

заканчивается переходом дефектов, возникших в процессе разрушения, в дефекты более мелкого масштаба и более равномерным их распределением по всему объему породы. Очаги разрушения исчезают, начальная блочность 1 и дефектность 2 пород восстанавливаются (рис.2, *а*).

Таким образом, исходя из вышеприведенной реконструкции первоначальной структуры породы, можно предложить следующую модель разрушения горных пород. Горная порода изначально имеет блочно-иерархическую структуру 1 и содержит множество дефектов 2 различного уровня и генезиса (рис.2, *а*). Под действием внешнего энергетического поля (E) в объеме породы происходит генерация и накопление микро-трещин и дефектов различного уровня. Благодаря этому, в зоне концентраторов напряжений образуются очаги разрушения 3 (рис.2, *б*). Одновременно с этим по траекториям будущих магистральных трещин происходит генерация и накопление дефектов. Эти процессы выделяют по траекториям будущих магистральных трещин определенные малодефектные объемы породы 5, обра-

зуя вокруг них как бы «оболочки» 4 (рис.2, *в*). Так как эти «оболочки» представляют собой разуплотненное тело породы, то правильнее называть ее дилатансионной, а выделенные объемы – фрагментами. Согласно дилатонному механизму разрушения, разуплотнение «оболочки» свыше 1 % ведет к разделению фрагментов, т.е. к образованию отдельных кусков. Причем порода может разделиться (рис.2, *е*, *жс*) по всем этим фрагментам как мгновенно, так и за длительный период времени. Мгновенно порода разрушается, если внешнее, объемное воздействие E имеет энергию большой мощности, и за более длительное время – при малой мощности. Однако процесс разрушения энергией малой мощности может быть мгновенным, если будет приложено дополнительное, локальное воздействие P (рис.2, *г*). Но при этом порода разрушается на меньшее число кусков (рис.2, *д*). Фрагментация горных пород при разрушении в настоящее время является еще неразработанной проблемой [1], хотя, по нашему мнению, в современных представлениях о разрушении горных пород фрагментация имеет исклю-

чительное значение. Из приведенной модели видно, что генерация и накопление дефектов, рост и слияние микротрещин завершаются образованием дефектной зоны в виде отдельных поверхностей, которые выделяют из общего объема отдельные объемы, т.е. фрагменты. Таким образом, все поверхности сопряжения фрагментов представляют собой дилатансионные «оболочки». Можно утверждать, что без дилатансионной «оболочки» нет и фрагментации, так как только дилатансия и порождает фрагментацию.

Дилатансионная оболочка, видимо, такое же макропроявление энергетической структуры вещества, как и явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг горных выработок и слоистой структуры Земли (зоны геодезинтеграции).

Если в этой модели дилатансионную оболочку заменить упругими связями, получим модель массива горных пород, представленную как комбинацию геоблоков с сухим трением и упругими пружинами (рис.3) [6]. Здесь упругие элементы моделируют реальные макротрещины и зоны дезинтеграции.

Модель хорошо описывает поведение геосред при динамических воздействиях, в том числе и возникновение маятниковых волн (μ -волн) [4]. Исходя из определенной доли адекватности этих двух моделей, можно перенести поведение геоблоков при динамическом воздействии и на фрагменты, которые образуются в процессе разрушения. Это позволяет говорить о возможности воз-

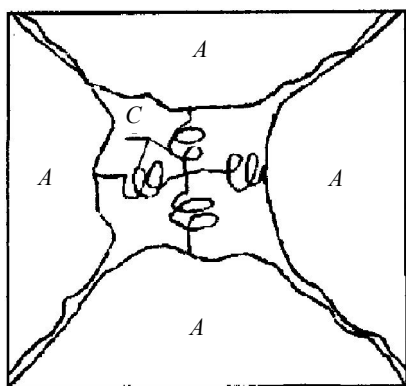


Рис.3. Модель массивов по М.В.Курлене и др., представленная блоками сухого трения A и пружин C

буждения маятниковых волн при механическом или комбинированном воздействии на горные породы. При этом носителем μ -волн будут фрагменты разного масштабного уровня. Таким образом, рассматривая фрагменты как геоблоки разного масштабного уровня, некоторые результаты работ М.В.Курлени можно использовать и при анализе колебаний фрагментов и параметров дилатансионных зон. Исходя из этого, можно сделать теоретический прогноз толщины дилатансионной оболочки как ширины между блоками массива горных пород [3] (13 % от протяженности фрагментов одного порядка) и оценить скорость распространения этих волн – 300-600 м/с [4].

С маятниковыми волнами связан эффект аномально низкого трения между блоками горных пород при их динамическом нагружении [5]. Принимая во внимание, что при различных механических способах бурения потери на трение составляют от 40 до 60 % от всей подводимой к инструменту энергии, можно утверждать, что исследование и использование этого эффекта при разрушении горных пород, несомненно, весьма перспективно.

Предложенное модельное представление о разрушении не противоречит двухстадийной модели разрушения, развиваемой во ФТИ им. А.Ф.Иоффе [2]. Более того, образование дилатансионной оболочки и связанная с ней фрагментация горных пород представляют собой процесс завершения первой стадии, а отделение фрагментов – второй. Фрагментация породы образует новую структуру породы, отличную от исходной. Эта структура, названная структурой разрушения, представляет собой промежуточное состояние породы от исходного до распада на куски. Порода в промежуточном состоянии может находиться сравнительно долгое время. Однако при этом фрагментационная картина может постоянно меняться как от внутренней флуктуации энергии, так и при поступлении энергии извне. Изменение фрагментационной картины есть следствие обмена энергиями между фрагментами и дилатансионной оболочкой, перехода энергии одного вида в другой. В результате

этого дилатансионная оболочка местами уплотняется, и фрагменты как бы сливаются, объединяются в более крупные, а в следующий момент эти фрагменты могут распасться в более мелкие. Однако при всем этом сохраняется иерархическая последовательность преимущественных размеров фрагментов.

Из вышеописанной модели видны не только наши представления о процессах разрушения горных пород, но также и новые пути подхода к разработке более эффективных способов разрушения. Сравнивая рис.2, *г* с рис.2, *ж* можно сделать вывод о двухстадийном способе разрушения: объемным воздействием E малой энергии вызывать объемную фрагментацию породы, а локальным воздействием P завершать процесс разрушения с минимальным количеством образующихся при этом кусков. Модель также показывает возможность возникновения маятниковых волн, способствующих в процессе разрушения минимальным потерям на трение. При этом гранулометрический состав продуктов разрушения может подсказать резонансную частоту вибровоздействия.

В заключение также заметим, что дилатансионная оболочка может реально

существовать в кусочно-прерывистом виде, а представление ее в сплошном виде есть некоторая схематизация, которая сравнительно просто объясняет фрагментацию горных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Викторов С.Д.* Фрагментация сплошной среды при многократном динамическом нагружении в условиях разупрочнения / С.Д.Викторов, А.П.Кузнецов // ФТПРПИ. 1995. № 3. С.31-36.
2. *Дамаскинская Е.Е.* Двухстадийная модель разрушения горных пород / Е.Е.Дамаскинская, В.С.Куксенко, Н.Г.Томилин // Физика Земли. 1994. № 10. С.47-52.
3. *Курленя М.В.* О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядах атомно-ионных радиусов / М.В.Курленя, В.Н.Опарин // ФТПРПИ. 1996. № 12. С.3-14.
4. *Курленя М.В.* Волны маятникового типа / М.В.Курленя, В.Н.Опарин, В.И.Востриков // ФТПРПИ. 1996. № 3. С.3-7; № 4. С.3-39; № 5. С.3-19.
5. *Курленя М.В.* Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах / М.В.Курленя, В.Н.Опарин, В.И.Востриков // ФТПРПИ. 1997. № 1. С.3-16.
6. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне / М.В.Курленя, В.Н.Опарин, А.Ф.Ревуженко, Б.И.Шемякин // ДАН. 1987. Т.293. № 1. С.67-70.
7. *Садовский М.А.* О свойстве дискретности горных пород / М.А.Садовский, Л.Г.Болховитинов, В.Ф.Писаренко // Физика Земли. 1982. № 12. С.3-18.