РАЗРЫВНЫЕ НАРУШЕНИЯ КАК ФРАКТАЛЬНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Т.Ю. Тверитинова, Н.Н. Курдин
Геологический факультет Московского государственного университета, Москва, Россия
tvertat@geol.msu.ru, tvertat@newmail.ru

В геологической литературе все более широко развиваются представления о нелинейности геологических процессов, о геологической среде как саморазвивающейся открытой системе и о фрактальном характере многих геологических объектов (Мирлин, 2001, 2004; Шерман, Гладков, 1999; Шерман и др., 2001; Sherman&Gladkov, 1999 и др.). Фрактальный объект обладает свойством бесконечной дробности элементов при сохранении их подобия, что отвечает его многоуровенной структурной организации. Математически это выражается в дробной (фрактальной) размерности (D) объекта – показателе степени отличия занимаемого им пространства от идеального топологического трехмерного пространства, которому он принадлежит. То есть фрактальная размерность объекта показывает соответствие объема объекта объему включающего его пространства (Шредер, 2005).

Объекты, состоящие из элемента ***l***, в трехмерном Евклидовом пространстве могут быть точкой, линией, плоскостью или объемом: *точка* $0_e=1^0x1^0x1^0=1^0$; *линия* $L_e=1^lx1^0x1^0=1^1$; *плоскость* $S_e=1^lx1^1x1^0=1^2$; *объем* $V_e=1^lx1^1x1^1=1^3$. Во фрактальных системах показатель степени ***D*** элемента ***l*** является дробным числом: $0<D<3$. Фрактальная линия на плоскости описывается уравнением: $L_f=1^lx1^{0<D<1}x1^0=1^{1<D<2}$; фрактальная линия в объеме: $L_f=1^lx1^{0<D<1}x1^{0<D<1}=1^{1<D<3}$. Многие объекты реального мира являются фрактальными системами, единичными элементами в которых могут быть более сложно организованные (например, на базе элемента ***l***) объекты ($\boldsymbol{s=l^2}$, $\boldsymbol{v=l^3}$ и т.д.). В трехмерном пространстве фрактальная плоскость может быть описана уравнением $S_f=s^lx1^{0<D<1}=l^2x1^{0<D<1}=1^{2<D<3}$; объем $V_f=v^lx(1^{0<D<1}x1^{0<D<1}x1^{0<D<1})=l^3x(1^{0<D<1}x1^{0<D<1}x1^{0<D<1})=1^{3<D<6}$. В теоретических фрактальных системах общий показатель степени может принимать любые значения, что будет указывать на многомерность или многопорядковость (многоранговость, многоуровенность) пространства этого объекта.

Реальные объекты являются телами сложной морфологии – кривые линии, искривленные плоскости, сложной формы объемы. Размерность таких объектов определяется заполненностью трехмерного пространства, т.е. размерность любого объекта – и линии, и плоскости, и объема – изменяется от 0 до 3. Размерность линии: $0\le D_l\le 3$; плоскости – $0\le D_s\le 3$; объема – $0\le D_v\le 3$. Значение $D=0$ означает, что объект превращается в точку, $D=3$ – что объект полностью занял данное пространство (и, если перейти на уровень самого этого пространства, то его размерность будет равна 0). Значение $0<D<3$ означает, что объект занимает часть пространства.

Один и тот же объект в разной системе отсчета (в пространстве разного объема) будет иметь разную размерность. Если брать за систему отсчета сам объект, его размерность стремится к 0, т.е. он превращается в точку. Если брать объект как элемент системы, сопоставимый с ней по размеру, то его размерность $0<D<3$, но для линии D стремится к 1, для плоскости – к 2, для объема – к 3. Если элемент системы близок по размеру к самой системе, то его размерность стремится к 3, будь то линия, плоскость или объем.

Если некий объем заполняется объектом, то в этом объеме есть объект и окружающее его пространство. Общая размерность объема – 3, при этом размерность объекта $0<D<3$, размерность окружающего объект пространства также $0<D<3$. За счет роста объекта в данном объеме уменьшается объем окружающего объект пространства. Объект, равный по объему системе, т.е. объект, полностью занимающий выбранный объем, имеет размерность $D=3$, размерность окружающего объект пространства в этом объеме $D=0$. В то же время, если за систему отсчета брать сам объект, то его размерность будет уже не 3, а 0.

Для определения фрактальной размерности имеет значение направление развития объекта. Росту объекта соответствует увеличение его фрактальной размерности, редукции объекта – уменьшение фрактальной размерности. Объект, не полностью заполняя пространство, сочетается с другим объектом, соответствующим среде с другими свойствами. Например, система частиц в породе сочетается с межзерновым пространством; система дизъюнктивных нарушений – с системой ненарушенных блоков и т.д. Оба объекта занимают одно пространство и общая размерность их равна 3, а размерность каждого – соответственно проценту занимаемого объема данного пространства.

Существуют различные классификации фракталов (Классификация…, 2006), но все природные фрактальные системы как «статические заполнители пространства» являются геометрическими фракталами, а как системы, развивающиеся во времени – динамическими. С этой точки зрения любые фракталы характеризуются определенными параметрами в законах геометрического самоподобия (фракталы с точки зрения пространственной геометрии) и воспроизводимости во времени (фракталы с точки зрения динамики развития фрактальной системы).

Дизъюнктивные нарушения являются характерным примером природной фрактальной системы. Это разномасштабные плоскостные объекты, разделяющие геологические массивы на изолированные или полуизолированные блоки. Элементарная составляющая системы – элементарный дизъюнктив – реальная сложно построенная поверхность ($\boldsymbol{s_r}=\boldsymbol{l_e}^{\boldsymbol{2}}$), динамически развивающаяся во времени ($\boldsymbol{t}$). Пространство, занимаемое множеством элементарных дизъюнктивов – геологическая среда – неоднородное, нелинейное, неравновесное, самоорганизующееся открытое пространство, с постоянно меняющимися нестационарными динамическими условиями внутренних и внешних напряжений.

Свойства дизъюнктивов как геометрической фрактальной системы проявляются в самоподобии структурных рисунков дизъюнктивов на любом структурном уровне – от глобальных общепланетарных дизъюнктивных систем до микротрещиноватости. Рассматривая структуры разрушения геологической среды в любом масштабе, мы видим повторяющиеся сочетания элементарных для данного уровня дизъюнктивов в более сложные системы – зоны концентрации деформаций (Расцветаев, 1987 и др.). Это касается, во-первых, общей делимости геологической среды на всех структурных уровнях, на первый взгляд, казалось бы, с хаотическим распределением дизъюнктивов. При статистической обработке в этом геометрическом хаосе разрывных нарушений выявляются определенные системы, закономерным образом связанные с анизотропными свойствами геологической среды и общими условиями нагружения геологических объемов (планетарная трещиноватость, закономерная ориентировка линеаментов и т.д.). Это также касается и выделения среди всего множества дизъюнктивов различных морфокинематических систем, отражающих различную реакцию среды на реализованные напряжения.

Свойства дизъюнкивов как динамической фрактальной системы проявляются в самоподобии параметров постоянно меняющихся во времени и пространстве полей тектонических напряжений. Сохранение законов разрушения геологической среды и в этом случае определяет самоподобие геометрического пространственного образа фрактальной системы дизъюнктивов, т.е. система дизъюнктивов как геометрический фрактал остается с течением времени также самоподобной. Динамические параметры дизъюнктивных систем мы фиксируем, как и параметры геометрического самоподобия, по структурным рисункам дизъюнктивных систем, но уже с учетом разновозрастности дизъюнктивных деформаций. Для каждого этапа развития геологического объекта мы говорим об определенных условиях нагружения геологического объема (сжатие – растяжение, сдвиг, кручение и т.д.) и результатах разгрузки напряжений в виде определенных (и определенным образом связанных) дизъюнктивов.

Дизъюнктив в трехмерном пространстве $S_f=s_r^1 x1_r^{0<D<1}$. Если $s_r=l_r^2$, то общий фрактальный показатель множества дизъюнктивов должен превышать 2. Значение мощности дизъюнктива $\Delta=1_r^{0<D<1}$ малая, но значимая величина, т.е. множество отрезков размером Δ могут покрыть всю длину 1_r^1, и плоскости $S_r=1_r^2\ x1_r^{0<D<1}$ могут заполнить собой все пространство $V_r=l_r^3$. В этом случае фрактальная размерность множества этих плоскостных элементов составит $D=3$.
Фрактальность дизъюнктивов обозначает, что в каждом реальном объеме $V_r=l_r^3$ развиты плоскостные элементы (являющиеся в реальности телами «плоско-объемными» $S_r=1_r^2\ x1_r^{0<D<1}$) разного порядка.

Рассчитаем фрактальную размерность теоретического множества двумерных дизъюнктивов в трехмерном пространстве. Система дизъюнктивов, каждый из которых является «плоским объемом» $S_n=1_n^2\ x1_r^{0<D<1}$, это система объектов разного структурного уровня: $p_1, p_2, p_3,\dots p_n$. Пусть количество дизъюнктивов соседних структурных уровней отличается в q раз. Примем также, что и параметры (площадь и мощность) дизъюнктивов соседних структурных уровней тоже отличаются в q раз, то есть объем единичных дизъюнктивов соседних структурных уровней отличается в q^2 раз. Примем также, что в объеме $V_r=l_r^3$ фрактальная система дизъюнктивов содержит n элементов $1_n^2x\Delta_n$, qn элементов $1_{n+1}^2\ x\Delta_{n+1}$, q^2n элементов $1_{n+2}^2\ x\Delta_{n+2}$ и т.д., а также $q^{-1}n$ элементов $1_{n-1}^2\ x\Delta_{n-1}$, $q^{-2}n$ элементов $1_{n-2}^2\ x\Delta_{n-2}$ и т.д. При этом: $1_{n-1}^2=q1_n^2;\ \Delta_{n-1}=q\Delta_n$

$$1_{n+1}^2=q^2 1_n^2;\ \Delta_{n+1}=q^2\Delta_n \text{ и т.д.}$$

Общий объем дизъюнктивов соседних структурных уровней при этом будет отличаться в q раз. Чем меньше дизъюнктивы, тем меньше их общий объем в данном пространстве. Объем всех дизъюнктивов в объеме $V_r=l_r^3$ равен сумме геометрической прогрессии:

$$Vd=n1_n^2x\Delta_n(1 + 1/q + 1/q^2 + 1/q^3+\dots+ 1/q^m)=n1_n^2x\Delta_n x(1-1/q^m)/(1-1/q)=n1_n^2x\Delta_n x(q^m-1)/q^{m-1}(q-1).$$

Значение $(1-1/q^m)/(1-1/q)$ при $m\to\infty$ стремится к $1/(1-1/q)=q/(q-1)=1+1/(q-1)$,

т.е. $$Vd=n1_n^2x\Delta_n(1 + 1/q + 1/q^2 + 1/q^3+\dots+ 1/q^m)=n1_n^2x\Delta_n x(1+1/(q-1))=n1_n^2x\Delta_n+n1_n^2x\Delta_n/(q-1)$$

Таким образом, общий объем фрактальной (сложной многоуровенной ($m>>1$)) системы дизъюнктивов в данном объеме больше объема дизъюнктивов, сопоставимых с размерами данного объема (1_n^2), в $q/(q-1)$ раз или на $n1_n^2x\Delta_n/(q-1)$, где $q>1$ – параметр отличия дизъюнктивов соседних структурных уровней.
При $q=2$ общий объем многоуровенной системы дизъюнктивов в данном объеме в 2 раза больше объема дизъюнктивов площадью 1_n^2. При $q>2$ суммарный объем дизъюнктивов все меньше отличается от объема основной системы дизъюнктивов. При $2>q>1$ общий объем многоуровенной системы дизъюнктивов изменяется от 2 до ∞.
Если объем системы l_r^3, а основные дизъюнктивы размерности 2 имеют объем $n1_n^2x\Delta_n$, то размерность двумерной системы дизъюнктивов в сопоставимом с ней по размеру объеме ($1_n=1_r$) равна: $2+n1_n^2x\Delta_n/l_r^3/(q-1)=2+n\Delta_n/l_n/(q-1)$.

Авторами в составе Центрально-Кавказской партии геологического факультета МГУ проводилось изучение распределения дизъюнктивных нарушений в слабодислоцированных моноклинально залегающих карбонатных толщах верхнего мела вдоль эскарпа Джинальского хребта (Центральный Кавказ) с оценкой их количественных параметров (см. рис. 1). Анализировалось распределение дизъюнктивных структур нескольких структурных (фрактальных) уровней: крупных трещин (S>10000 кв.м; h~0,1-1м); небольших разрывов (S>100000 кв.м; h~1-10м); более крупных дизъюнктивных нарушений, выраженных линеаментами (S>1 кв.км, h~10-50м) и линеаментными зонами (S>10 кв.км; h~50-100м).

Рассчитаем порядок плотности дизъюнктивов на рассмотренном участке в объеме 1x1x1 $км^3=10^9 м^3$, принимая максимальные значения для ширины зон дробления каждого дизъюнктива: h~100 м для крупных нарушений с $S>10^6 м^2$ и h~10 м для более мелких дизъюнктивных структур с $S>10^{4-5}$ кв. м. На общую длину изученного участка L~12-15 км приходится 12 крупных, т.е. густота крупных дизъюнктивов составляет $\sim0{,}001 м^{-1}$, а наблюдаемая в обнажениях густота мелких нарушений составляет 1-2 на 100 м, т.е. $\sim0{,}01-0{,}02 м^{-1}$. В рассматриваемом объеме $10^9 м^3$ в среднем будет располагаться один относительно крупный дизъюнктив мощностью 100м, а также 10-20 более мелких структур общей мощностью ~10-20м. Занимаемый ими объем составит соответственно $>10^8$м^3 и $>2x10^{5-6}$м^3 или ~101x10^{6}м^3. Из общего объема 10^{9}м^3 дизъюнктивы занимают ~101x10^{6}м^3/10^{9}м^{3}x100%~10,1%, что составляет от общей размерности рассматриваемого объема (3) 0,303. Фрактальная же размерность, с учетом того, что в объеме присутствуют структуры, полностью покрывающие одну сторону этого объема, т.е. 10^{6}м^2=10^{3+3}м^2, а по третьему направлению дизъюнктивные структуры занимают 1,01x10^2/10^3 часть, составляет 2+1,01x10^2/10^3=2+1,01x10^{-1}=2,101.

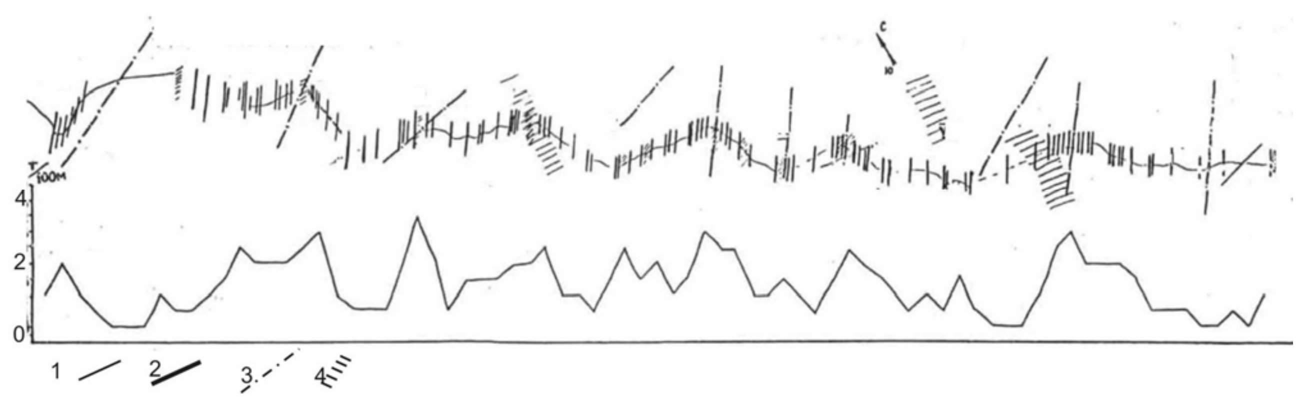

Рис. 1. Схема распределения картируемых дизъюнктивных нарушений вдоль эскарпа Джинальского хребта и график распределения их густот. 1 – крупные трещины (S>10^{4}м^2; h~0,1-1м); 2 – небольшие разрывы (S>10^5 м^2; h~1-10м); 3-4 – более крупные дизъюнктивные нарушения, выраженные; 3 – линеаментами (S>10^6 м^2, h~10-50м); 4 – линеаментными зонами (S>10^6 м^2; h~50-100м). Площадь участка ~12-15 км х 1 км.

Горные массивы рассечены и более мелкими трещинами с меньшей мощностью, но большей густотой. Можно принять, что с переходом к более мелким структурам, уменьшающимся на порядок по площади, мы будем получать в результате все меньшие общие для данного участка мощности зон дробления. Суммируя все мощности дизъюнктивов, мы получим размерность нарушенного пространства данного участка.

Чем больше фрактальная размерность системы дизъюнктивных нарушений, тем больше нарушенность геологической среды и выше ее динамическая неустойчивость. Динамическая неустойчивость проявляется во взаимодействии дизъюнктивов соседних уровней и формировании в геологическом объеме новых структур разрушения, что сопровождается на региональном структурном уровне сейсмическими процессами. Фрактальная размерность увеличивается при уменьшении разности параметров дизъюнктивов соседних уровней, достигая максимальных значений при $2>q>1$. При $q>2$ фрактальная размерность системы разрывных нарушений резко уменьшается, приближаясь к размерности главной системы, т.е. чем более резко отличаются дизъюнктивы соседних структурных уровней, тем более устойчива вся система в целом.

Список литературы

1. Мирлин Е.Г. Фрактальная размерность литосферы и геодинамика // ДАН. 2001. Т. 379. № 2. С. 231-234.

2. Мирлин Е.Г. Фрактальная дискретность литосферы // Планета Земля. Энциклопедический справочник. Том «Тектоника и геодинамика». Изд-во ВСЕГЕИ. С-Пб, 2004. С. 140-143.

3. Шерман С.И., Гладков А.С Анализ фрактальных размерностей разломов и сейсмичности в Байкальской рифтовой зоне – Геология и геофизика, 1999, т.40, №1; с.28-35.

4. Шерман С.И., Сорокин А.П., Черемных А.В. Новый подход к тектоническому районированию Приамурья по фрактальной размерности разломов земной коры // ДАН. 2001. Т. 381. № 3. С. 1-5.

5. Sherman S.I., Gladkov A.S. Fractals in studies of faulting and seismicity in the Baikal rift zone - Tectonophysics, 1999, v.308; p.133-142.

6. М. Шредер. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Перевод с английского Ю.А. Данилова, А.Р. Логунова. Под ред. А.В. Борисова // Москва-Ижевск, 2005. 528 с.

7. Классификация фракталов // http://fractalworld.xaoc.ru/article/class.html

8. Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений. В кн.: «Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов». М.: ГИН АН СССР, 1987. С. 173-235.