

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ – РЕСУРС НОВЫХ ЗНАНИЙ О СРЕДЕ ИХ ЗАРОЖДЕНИЯ

Синергетические принципы геологического анализа. Статья 3.

П. М. Горяинов, Г. Ю. Иванюк

КНЦ РАН, Апатиты

Поступила в редакцию 8 августа 2012 г.

Аннотация. Пространство месторождений железистых кварцитов является типичным хаотическим фракталом. Его размерность Минковского ($D_m \approx 1,8$) подчеркивает его принадлежность к перколяционным кластерам – связным фрактальным структурам протекания сквозь случайную пористую среду. Математическая теория перколяции – универсальный аппарат, используемый для анализа распространения эпидемий, развития экономических кризисов, прочностных свойств материалов и пр. Физическая перколяция идеально подходит для иллюстрации и объяснения процессов рудообразования вследствие протекания растворов через массивы горных пород. Это ключевое понятие для формирования представлений о генезисе железных руд докембрия.

Ключевые слова: фрактал, перколяционные кластеры, П.Ж.Ф., новая парадигма геологии.

Abstract. The space of Precambrian iron ore deposits is typical casual fractal. Minkowsky dimension ($D_m = 1,8$) underlines its membership to percolation clusters – the connected fractal structures of passing through a casual porous medium. The mathematical percolation theory – the universal apparatus used for the analysis of extending of epidemics, developments of economic crises, strength property of materials and others. The physical percolation ideally agree with an explanation of oreforming processes owing to a passing of solutions through rock masses. This key concept for shaping representations about genesis of iron ores of the Pre-Cambrian.

Key words: fractal, percolation clusters, B.I.Fs, new paradigm of Geology

Введение

Обратимся к исходной аксиоматике железорудной геологии. Ее можно свести к следующим положениям:

– как бы ни выглядели рудовмещающие породы, все равно их исходный состав определялся принадлежностью к седиментационной латерали;

– как бы ни залежали рудные тела, их первоначальное залегание было горизонтальным, как и положено осадкам;

– как бы не различались между собой структурные узоры месторождений, все разнообразие тектонических структур определяется существованием двух их состояний: доскладчатого, или в целом, до-деформационного (в терминах и понятиях типа «седиментационные ванны и бассейны», «структурно-фациальные зоны», «палеорифты» и пр.) и пост-складчатого (складчато-метаморфические или зеленокаменные пояса, синклинали, синформы или моноклинали, деструкционные зоны тектонической активизации и пр.);

– как бы не изменялся формационный спектр и парагенезисы железных руд, в любом случае

кремнезем и оксиды железа, составляющие в сумме около 100 %, – это изначально гидрохимический мобилизат осадочного или вулканического происхождения.

Эти постулаты, основательно вросшие в проблему как исходные аксиомы, и группируют вокруг себя лавинообразно накапливающийся фактический материал. Как теперь выясняется, – на весьма необеспеченной теоретической основе.

Обратимся к характерным свойствам тел железистых кварцитов. Поскольку все границы в пределах рудных тел резкие, положение и структура занимаемого железистыми кварцитами пространства напрямую определяется их геометрическими контурами. К примеру, противоположный случай: контуры рудных тел определяются исключительно по условным границам, выявляемым по результатам опробования рудоносных пород (как, в частности, для апатитовых, платинометаллических, медных и др. месторождений с рассеянным оруденением).

Фрактальная кластеризация рудных тел

В качестве примера рассмотрим Кировогорское месторождение (Кольский п-ов), на котором линзы

железистых кварцитов, отделенные друг от друга прослоями кислых гнейсов и биотититов, дайками долеритов и жилами керамических пегматитов, сгруппированы в три обособленных тела – гломеры (рис. 1, левый). При этом, как отдельные линзы, так и их пакеты (гломеры), имеют утолщенную северо-западную и плавно сходящую на-нет юго-восточную части, что напоминает спины разновозрастных морских животных, плывущих в северо-западном направлении [1]. Если плотно покрывать изображенные на рис. 7, а сечения квадратными ячейками, то зависимость числа таких ячеек от их размера хорошо аппроксимируется степенной функцией с показателем $2D_M = 1.50 - 1.56$ (рис. 1, правый).

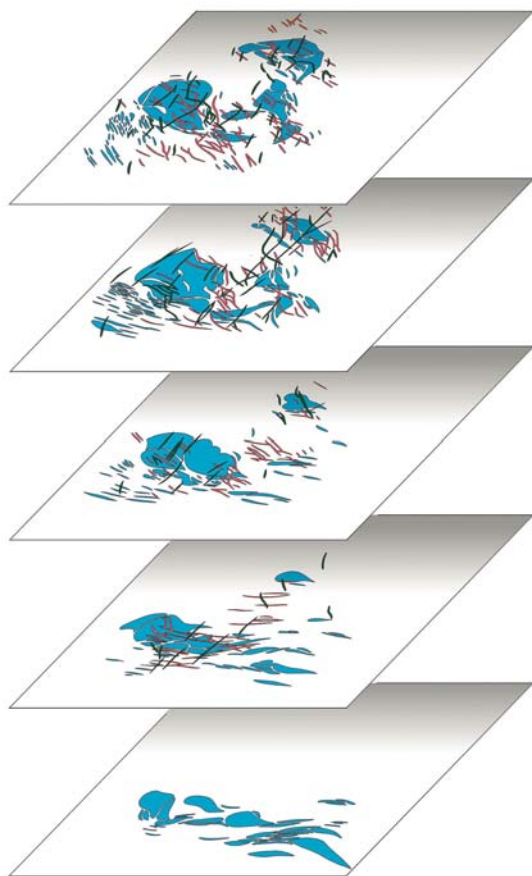


Рис. 1. Слева – геологические планы горизонтов +200 – –40 м (Кировогорское месторождение, Кольский п-ов) и справа – графики фрактальной размерности рудных контуров (число N квадратных ячеек размера $n \times n$, потребовавшихся для полного покрытия составляющих его линз железистых кварцитов как функция r)

На разрезах (рис. 2) стиль строения рудных тел не меняется – это по-прежнему достаточно плотно

упакованные линзовые пакеты с размерностью порядка 1.60.

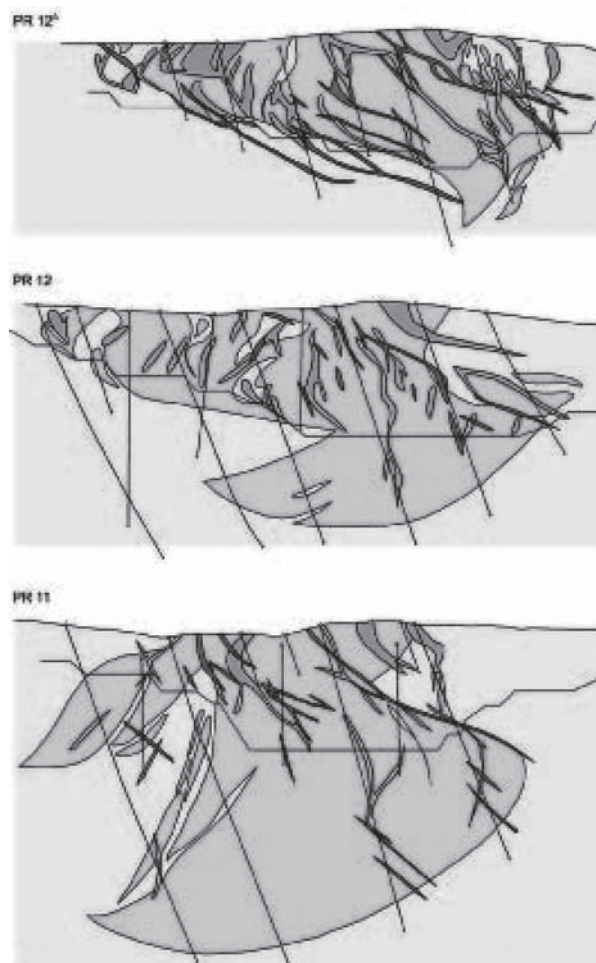


Рис. 2. Разрезы Кировогорского месторождения (северо-западный фланг).

Диспергированное тело железистых кварцитов состоит из нескольких линзовых пакетов, сгруппированных так, что сечение рудного тела напоминает профиль гребня штормовой волны.

Рои пегматитовых и диабазовых даек строго привязаны к рудной зоне

Соответственно, мы можем, используя правило Мандельброта [2], оценить общую фрактальную размерность линзового ансамбля Кировогорского месторождения как $D \approx 2D + 0.5(2D) \approx 2.3$. В принципе, последняя оценка является весьма приближительной, поскольку размерность явно зависит от направления сечения.

Фрактальная структура Кировогорского месторождения демонстрирует еще целый ряд крайне любопытных свойств. Одно из них состоит в том, что признаки активной динамики на микроуровне (характерная «джеспилитовая» микроплойчатость и мелкие складки как проявление вязкого течения,

шарнирные вращения микроблоков с плоскостями межблоковой тектонической делимости, фиксированными высокотемпературными парагенезисами и т. п.) не переходят на макроуровень. При этом выдерживается стиль строения, т.е. иерархическая складчато-линзовая организация ансамбля. Иными словами, рудное тело являет собой классический пример гомеостаза – консервативности различных признаков видовой устойчивости, что характерно для живой природы. Минеральные парагенезисы, фиксирующие межблоковые смещения, изофаціальны с таковыми в субстрате (рис. 3), т.е. блокировка произошла одновременно с формированием породного комплекса вместе со структурным узором! Таким образом, внутрирудная складчатость, внутрирудная блокировка и «метаморфическое» минералообразование – один и тот же процесс, ответственный за формирование внутрирудного пространства, а не последовательное наложение одних процессов на предыдущие.

Подчеркнем, что рудное тело рассечено многочисленными разломами, сопровождаемыми местными межблоковыми смещениями. На первый взгляд, это легко вписывается в деструктивно-блоковую тектоническую модель с мозаикой «активизированного» структурного комплекса [3]. Но идея



Рис. 3. Фрагмент внутрирудной блокировки железистых кварцитов Кировогорского месторождения с шарнирным вращением микроблоков.

Шов выполнен диопсидом, грюнеритом, магнетитом и пиритом

тектонической активизации и тектонической деструкции, как оказалось, не отвечает реальному положению вещей!

Нетрудно представить, насколько неожиданными стали результаты документации границ рудных тел (рис. 4), которые всегда, на всех горизонталь-

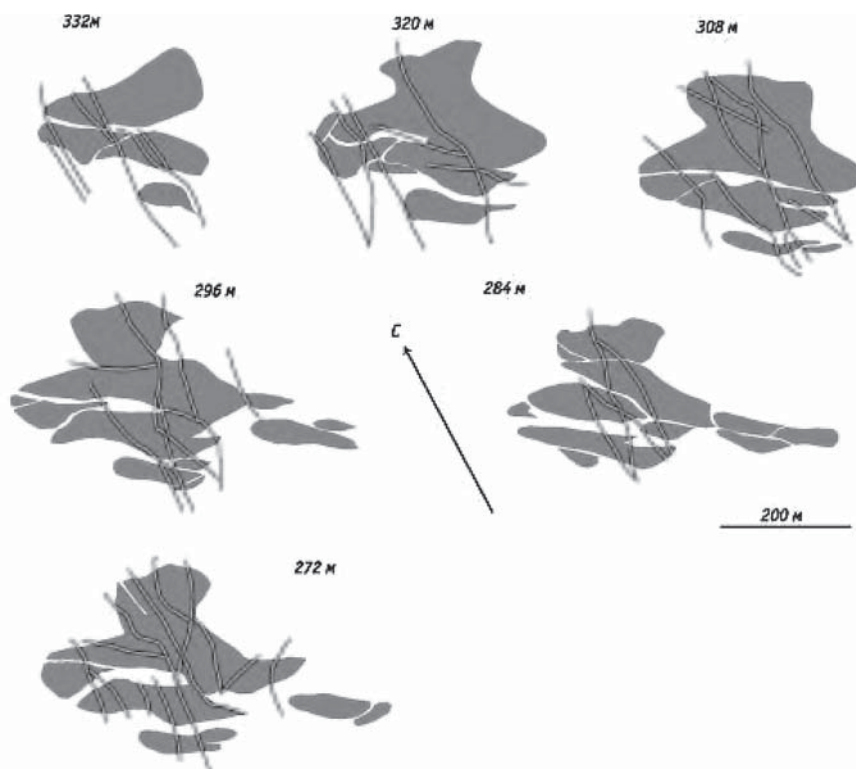


Рис. 4. Контуры тел железистых кварцитов на нескольких погоризонтных планах (по данным маркшейдерской съемки). Выделены тела пегматитов, которые фиксируют разломную сеть. Четко видно, что при избытии «активной» разломной сети контуры рудных линз не подвергнуты блоковым искажениям

ных и вертикальных сечениях оставались ровными, без угловатых сочленений и смещений!

Эти и многие другие признаки активной динамики, без труда идентифицируемые на детальном (“микро”-) уровне, не претерпевают масштабного тиражирования и копирования на макроуровне и не влияют на оформление контуров вещественных комплексов и границ ареалов: их вклад в оформление узора теряется при переходе на следующий, более высокий уровень. Пришлось считаться с тем, что необычайно широкое развитие дизъюнктивов не превращает контуры более крупных линзовых пакетов в ступенчатые, угловатые или другие искаженно-ломаные линии, как это можно было бы ожидать, следуя традиционной логике тектонических реконструкций (принципа накопления деформаций пропорционально изменению масштаба). Внутрелинзовые разломы, выходя за пределы линзы, не только никак не искажают ее плавно изогнутых очертаний – хотя внутри нее они контролируют шарнирные смещения и внутрирудную блокировку (см. рис. 3), – но даже не сопровождаются приразломными соподчинениями в полосчатых текстурах вмещающих гнейсов. Это важнейшее свойство рудного пространства, имеющее не только теоретическое, но и принципиальное технологическое значение: при интерпретации не всегда исчерпывающих данных разведочного бурения, особенно при определении внешних контуров рудных тел, должен быть исключен деструктивно-блоковый мотив.

Эта особенность регматической разломной сети («амплитудные смещения на микроуровне не повторяются на макро-уровне») заставила решительно отказаться от привнесения мозаично-блоковых мотивов в рисовку контуров на геологических картах, начиная с масштабов 1 : 10000 и мельче. Создается впечатление, что изобилие разломов на существующих картах кондиционных геологических съемок свидетельствует не столько о действительно высоком вкладе разломов в структурную организацию и оформление контактов, сколько о типичном проявлении цехового лукавства в интерпретации полевых наблюдений, призванного «компенсировать» неполноту последних и подменить очевидное незнание на знание кажущееся.

Анализ показывает, что фрактальная организация рудных тел, диспергированных на множество субординированных линз, не приводит к “перемешиванию” разреза. А далее, легко уяснить, что необычайное взаимоотношение линз и разломов – это продукт внутрелинзовых динамических про-

цессов (в частности, складчатости, вязкого течения, межблоковых смещений), которые были *взаимосогласованными, кооперативными*. Именно они и обеспечивали гомеостазис линзовых ансамблей, подобно тому, как активное движение молекул ртути обеспечивает гомеостазис термо-гравитационной конвективной структуры Бенара. Ну и последнее: по поведению отдельного блока (или даже отдельных блоков) некорректно делать однозначный вывод как о строении рудного тела, так и его симметрии и, тем более, о направлении внешних тектонических воздействий на систему.

Активная динамика, блокировка только в пределах контура рудной линзы при сохранении типичной для всей железорудной формации аутигенной зональности – эти два явления удивительны и необъяснимы с точки зрения существующей парадигмы и исследовательских традиций. Они касаются двух узловых вопросов структурной и региональной геологии: каковы же относительные возрастные соотношения границ рудных тел с вещественной зональностью? И как мог развиваться рудный процесс, если границы и определяемый ими узор не моложе вещества?

В традиционной модели последовательного перехода от процессов “конструктивного” (осадочного) к “деструктивному” (тектоническому) этапу вещество обязательно *древнее* наблюдаемых границ, а наблюдаемая зональность – это реликтовая компонента, уцелевшая в тектонически «недопереработанных» пластах и их фрагментах (см. *Введение*). В модели тектонического гомеостаза (на макроуровне – сохранение согласованных с веществом контуров, а на микроуровне – активная динамика) границы и вещество равноправны или *сингенетичны* как проявление синергизма, кооперативности процессов рудообразования [4].

Становится понятным, что именно нарушение системных ограничений для реконструкций и приводило ранее к ошибочной интерпретации данных детальных наблюдений, самих по себе вполне достоверных, высококачественных и многочисленных, т. е. далеко не случайных. И, как следствие, избыточность тектонически невоспроизводимых интерпретаций региональных работ.

В этом контексте очень полезна модель поведения блоков в условиях напряженной геофизической среды [5]. В соответствии с идеей М. А. Садовского [6–9] о дискретности геофизической среды, она состоит из жестких, упругих блоков, разделенных между собой пластичными прослойками. Нагружение и последующая перколяция (протека-

ние, перераспределение) напряжений вызывает взаимное проскальзывание и перекачивание блоков, постепенно охватывающее весь объем породы. Переход фрагментированной среды в полупластическое состояние делает предшествующее поле микровращений блоков неустойчивым – происходит их самоорганизация. Она и приводит, в конце концов, к возникновению стационарной структуры, гомеостазис которой обеспечивается активной динамикой микроблоков.

Меняя некоторые параметры, можно получить ряд крайне любопытных с точки зрения геотектоники узоров: валлообразных, мозаичных, вихревых или ячеистых (рис. 5). Из эксперимента И. А. Гарагаша [5] следует, что движение всех реально наблюдаемых блоков (или брекчий до стадии их консолидации) является взаимосогласованным. Подобная неоднородность была установлена в экспериментах с системами дисков, имитирующих зернистую среду [10], в ходе которых при нагружении среды диски группировались в блоки, вращаясь при этом *совершенно независимо* от главных напряжений. Теперь становится понятным, что внутрирудные брекчии с фрагментами порядка 0.1–3 см и угловатые тектонические блоки в несколько десятков метров – это когенетичные образования, представляющие собой части единой иерархической структуры [11]. Кроме того, получает теоретическую основу парадоксальное сочетание признаков активной динамики микроблоков железистых кварцитов внутри вполне устойчивых, неискаженных линзовых контуров. Предположение о том, что в природе существует обширная группа структур – объектов так называемой когерентной или резонансной тектоники [4, 5], – получает в вышеупомянутом численном эксперименте эффективное подтверждение. Рассмотренный эксперимент с обломками и его природный аналог на Кировогорском месторождении можно рассматривать в качестве тектонического эквивалента эффекта Бенара.

Соответственно, ни один блок в такой конструкции «не имеет права» на автономное, независимое от других блоков движение. А ведь только оно и позволяет оценить величину тектонического транспорта на основе кинематики смежных микроблоков посредством палинспастических реконструкций. Даже виртуальное «извлечение» любого блока из такой согласованной конструкции не оставит следа – система мгновенно перестроится для того, чтобы сохранить предыдущий структурный узор. Перефразируя знакомую формулу, получаем «нет при-

знаков относительных смещений – нет и проблемы координатных реконструкций».

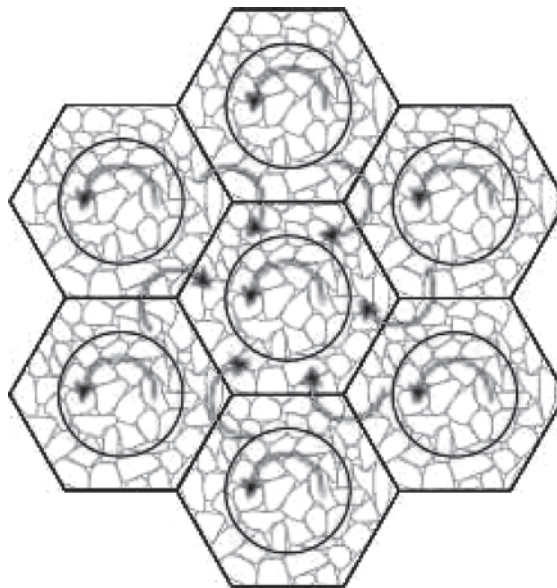


Рис. 5. Картина распределений микровращений в находящейся под нагрузкой дискретной геофизической среде [5]. На окружностях микровращения равны нулю

Резонансная тектоника ответственна не только за процессы, происходившие при формировании отдельных рудных тел и месторождений. Подобный тип когерентных соотношений дизъюнктивов с геологическими контурами (слоистостью, складчатостью, маркирующими породными границами) четко установлен и в ансамблях регионального уровня, что согласуется с важнейшими свойствами природных фракталов: самоподобием (масштабной инвариантностью) и наличием признаков дальнего порядка [11].

Это проявлено в особой кластеризации рудных тел, которая несет важнейшую генетическую и технологическую информацию.

Перколяционные кластеры – особый тип фрактальной организации рудных тел

Устойчивые тенденции железорудных ансамблей в самых разных обстановках формировать фрактальный структурный узор свидетельствуют о стремлении систем к неким устойчивым, т.е. более выгодно (упорядоченно) организованным, и к тому же часто повторяющимся стационарным состояниям. Подчеркнем: к стационарным, а не равновесным, что означает способность систем «успешно» приспосабливаться к динамическому воздействию средствами своей собственной, более

совершенной организации. Последняя может осуществляться лишь вдали от равновесия, как нелинейный отклик системы на внешнее воздействие. Поскольку эта особенность инвариантна относительно возраста, масштаба и состава, то становится очевидным, что, *во-первых*, должен существовать некий универсальный геодинамический механизм самоорганизации (и/или макроскопический физический закон) и, *во-вторых*, этот механизм должен запускаться энергопотоками планетарной (иначе – эндогенной) природы, которые трансформируются в зонах проницаемости в структурно-вещественные ансамбли разного облика. Очевидно также, что сами зоны проницаемости («протекания» или перколяции) составляют важный элемент этого механизма, приведшего к возникновению фрактальной структуры, элементов дальнего порядка и гомеостазиса.

Впервые идея о самоподобии геофизической среды была высказана М.А.Садовским [6–9]. В соответствии с этой идеей, он предлагал рассматривать литосферу как систему взаимодействующих неоднородностей, которые могут иметь различную природу: это геологические блоки, неоднородности горной породы, плотностные, химические, тепловые и другие неоднородности, различные агрегатные состояния вещества и т.д. В процессе *непрерывной подпитки эндогенной энергией* система неоднородностей-отдельностей самоорганизуется в единую диссипативную структуру, имеющую самоподобный (иерархический) характер.

Основы теории перколяции (от англ. percolation – протекание) были заложены С. П. Хамерсли и С. Р. Бродбентом [12] в связи с описанием процесса фильтрации жидкости или газа через случайную пористую среду. Впоследствии оказалось, что их подход универсален и может быть использован для изучения связности решеток электрических сопротивлений, сетей распространения эпидемий, кластеров отвердевающих полимеров, систем трещин, развития экономических кризисов и т. д. [9, 13]. Универсальность перколяционной модели заключается и в том, что кластер обязательно возникает при случайном расположении частиц (пор в горной породе, мономеров в реакциях полимеризации, микротрещин при разрушении твердого тела и т.п.) с достаточно высокой концентрацией. При этом, доля частиц, непосредственно вошедших в кластер и определяющих его структуру, будет сравнительно невелика [14]:

$$p_{\infty} \sim (p - pc)\beta,$$

где p_{∞} – доля узлов, принадлежащих кластеру; p – количество узлов в решетке, между которыми возможно протекание; pc – порог протекания (критическое число неразорванных связей между узлами, при которых появляется возможность протекания от одного края решетки к другому), β – коэффициент, который зависит только от размерности решетки d : $\beta = 5/36$ для двумерных решеток и $\beta = 0.4$ для трехмерных.

Сама по себе теория перколяции – это математическая абстракция, позволяющая моделировать перколяционные кластеры любой (!) природы путем либо численного эксперимента, либо с помощью физического эксперимента («математическая» или «физическая» перколяция). Существование процессов физической перколяции в геологической среде (протекание гидротермальных растворов, распределение эмиссионных потоков, разгрузка напряжений и пр.) приобретает для геологии исключительную содержательность, ибо, по Гераклиту, все течет, особенно в самой дифференцированной части литосферы. Иллюстрацией сказанному может служить перколяционная геодинамическая модель тектоносферы Земли, разработанная нами как альтернатива детерминистским плейтктонической и плюм-тектонической моделям [11, 15, 16].

Подчеркнем, что та часть перколяционной структуры (перколяционного кластера) которая непосредственно отвечает за возникновение связности, является *остовом перколяционного кластера* (рис. 6). И действительно, для трехмерных перколяционных кластеров размерность остова $D_M \approx 1.8$ [13, 17]. Достигнув состояния связности, фрактальная размерность перколяционной сети (кластера) уже не растет, а остается постоянной. Остов кластера отвечает не только за связность «идеального» кластера, но в «физическом» кластере контролирует самую богатую часть рудного тела [6, 10, 11, 17].

Оказалось, что и в строении продуктивных зон, как было установлено, практически всех, а не только железорудных, месторождений, проявлен мотив связной фрактальной структуры – т.е., перколяционного кластера. Так, в горизонтальных сечениях Костомукшского месторождения, на глубину около 100 м двумерная размерность Минковского (2D_M) остается постоянной на уровне 1,69–1,71, что отвечает размерности теоретического перколяционного кластера (рис. 7). Точно такую же структуру имеет рудное пространство на рассмотренном выше Кировогорском и на всех (!) остальных мес-

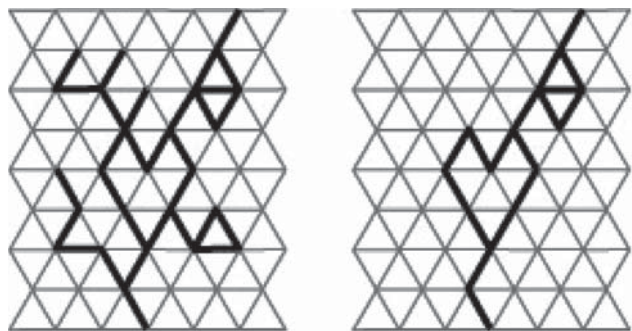


Рис. 6. Соотношение между морфологией перколяционного кластера (слева) и его остовом (справа)

Обычно «геологические» перколяционные кластеры имеют остов, фиксированный наиболее дифференцированным минеральным веществом, прежде всего, рудным



Рис. 7. Костомукшское месторождение железистых кварцитов. План расположения тел железистых кварцитов на горизонте +170 м.

Фрактальная организация рудного пространства при согласованном поведении вещественной зональности и структурного узора предельно ограничивает корректное использование литолого-стратиграфического аппарата

торожениях Кольского полуострова [11, 17]. Это значит, что традиционные «стратификационные» построения, особенно активно применяемые до сих пор карельскими геологами и от которых мы вынуждены отказаться почти 20 лет назад, являются заведомо неадекватными.

Заключение

Самоподобие в рассматриваемых структурах имеет универсальный характер и находит аналогию с фазовыми переходами 2-го рода [18]. Известно, что системы в таких переходах вблизи критических точек приобретают самоподобную структуру, в ней увеличиваются флуктуации и, что особенно важно, безгранично увеличивается радиус корреляции системы (радиус согласованного поведения подсистем-неоднородностей). Новая структура становится устойчивее благодаря более эффективной диссипации подкачиваемой энергии через систему связности (перколяционную сеть).

Такое свойство железорудных ансамблей кардинально меняет взгляд на природу структурно-вещественного узора. Но дело не только в изменении взглядов на генетическую природу этих узоров. Кардинально меняется и само направление дискуссии, и даже, что естественно, сам стереотип успешного исследовательского результата. В распространенной трактовке «слоистой» группы гипотез пространство, занимаемое железистыми кварцитами, – это пакеты слоев, одного или нескольких, составляющих рудную зону. Всякое отклонение от «правильной», т.е. изначально параллельно слоистой толщ рассматривается как результат наложенных, «деструктивных», тектоно-метаморфических событий.

Оказалось, что фрактальная кластеризация тел железистых кварцитов, которая проявилась сначала как фрактальная организация слоев, затем, с уменьшением масштабов, и складок, и лишь затем в виде фрактальных линзовых пакетов (перколяционных кластеров) масштабом от нескольких до десятков и сотен-первых тысяч метров, это самый ранний, «первичный», процесс. И вовсе не наложенный, вторичный. Это означает, что большинство аксиоматических понятий традиционной железорудной проблематики должно быть лишено такого статуса. Становится очевидным, что формирование характерных элементов узора железорудных ансамблей происходило вблизи поверхности одновременно с формированием вещественной зональности – профиль типа «штурмовой волны» свидетельствует о том, что зарождение высокодифференцированных ансамблей – это прерогатива

исключительно приповерхностных уровней, поскольку там нелинейно возрастает скорость разгрузки перколирующего энергопотока. Значит, архейская поверхность контролировала высокотемпературные процессы петро- и рудогенеза (а это 500–700°), что совершенно не допускало существования водной среды в железорудных “бассейнах” и любые попытки связать с железорудными формациями некие палеоэкологические ниши, которые были благоприятны для зарождения примитивной жизни, следует считать бесперспективными. Или надо существенно пересмотреть метаморфическую доктрину, которая предусматривает появление электроотрицательности катионов исключительно за счет тепловой накачки.

Формирование характерных элементов железистых кварцитов – полосчатости, кварц-магнетит-гематитового состава и складчатости – составляет содержание единого процесса, ибо они не обнаруживают признаков независимости (аддитивности) и одновременности. Явление может служить моделью образования складок и полосчатости в гнейсах.

Появление ПЖФ – составная часть, может быть даже сущность корообразующих процессов, которые осуществлялись во все времена, но особенно интенсивными они были в раннем архее. В связи с изменением режима эндогенной энергетической перколяции, с появлением гидросферы и более дифференцированных ландшафтов Земли менялся как облик, так и объем железистых формаций.

Справедливо отметить то, что время формирования детерминистских осадочных моделей железорудного пространства вполне обходилось без фракталов, перколяционных кластеров, не существовало понятия неограниченной когерентности многих переменных рассматриваемого рудного комплекса. В аппарате геологического анализа этого всего просто не было. Русло традиционной геологии было проложено далеко в стороне от теории самоорганизации и его следствий. Сейчас без этого аппарата трудно представить современное исследование железорудных систем. И не только их, а и многих других.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванюк Г. Ю. Введение в нелинейную геологию / Г. Ю. Иванюк, П. М. Горяинов, Д. Г. Егоров. – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1996. – 187 с.
2. Mandelbrot B. The fractal geometry of Nature / B. Mandelbrot. – S.-Francisco : W.H. Freeman, 1983. – 461 p.
3. Горяинов П. М. Беломорско-карельская активизация в тектонической окраине ареала железисто-кремнистых формаций Кольского полуострова – Кольско-Норвежского мегаблока / П. М. Горяинов // Геология рудных месторождений Кольского полуострова. – Апатиты : Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1981. – С. 45–58.
4. Горяинов П. М. Нелинейная тектоника. Содержание, объекты и принципиальные ограничения для интерпретации канонических случаев / П. М. Горяинов. – Апатиты : Изд-во КНЦ, 1995. – 45 с.
5. Гарагаш И. А. Микродеформации предварительно напряженной дискретной геологической среды / И. А. Гарагаш // ДАН. – 1996. – Т. 347, № 1. – С. 95–98.
6. Садовский М. А. О естественной кусковатости горных пород / М. А. Садовский // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 247, № 4. – С. 829–830.
7. Садовский М. А. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс / М. А. Садовский, Л. Г. Болховитинов, В. Ф. Писаренко. – М. : Наука, 1987. – 101 с.
8. Садовский М. А. Случайность и неустойчивость в геофизических процессах / М. А. Садовский, В. Ф. Писаренко // Физика Земли. – 1989. – № 2. – С. 3–12.
9. Садовский М. А. Сейсмический процесс в блоковой среде / М. А. Садовский, В. Ф. Писаренко. – М. : Наука, 1991. – 96 с.
10. Дрешер А. Определяющие законы механики грунтов / А. Дрешер, Ж. де Йоселен де Йонг // Механика. Новое в зарубежной науке. – М. : Мир, 1975. – С. 144–165.
11. Горяинов П. М. Самоорганизация минеральных систем / П. М. Горяинов, Г. Ю. Иванюк. – М. : ГЕОС, 2001. – 312 с.
12. Broadbent S. R. Percolation processes. 1. Crystals and mazes / S. R. Broadbent, J. M. Hammersley // Proc. Cambridge Philos. Soc. – 1957. – Vol. 53. – P. 629–641.
13. Челидзе Т. Л. Методы теории протекания в механике геоматериалов / Т. Л. Челидзе. – М. : Наука, 1987. – 136 с.
14. Зосимов В. В. Фракталы в волновых процессах / В. В. Зосимов, Л. М. Лямшев // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165, № 4. – С. 361–401.
15. Горяинов П. М. Перколяционные кластеры как главный структурный мотив литосферы / П. М. Горяинов, Г. Ю. Иванюк // Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма. Том I. – М. : Геос, 1999. – С. 215–218.
16. Горяинов П. М. Перколяционные тектонические системы – главный геодинамический мотив структурирования литосферы / П. М. Горяинов, Г. Ю. Иванюк // Теория диссипативных структур в геологическом анализе. – Апатиты : Изд-во Кольского НЦ РАН, 1998. – С. 35–40.
17. Иванюк Г. Ю. Самоорганизация рудных комплексов. Синергетические принципы прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых / Г. Ю. Иванюк [и др.]. – М. : ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2009. – 392 с.
18. Ландау Л. Д. Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд., доп. – М. : Наука, 1976. – 584 с.

Кольский НЦ РАН, Апатиты

*П. М. Горяинов, главный научный сотрудник лаборатории самоорганизации минеральных систем, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Тел. 8 (1555) 79250
pgor@geoksc.apatity.ru*

*Г. Ю. Иванюк, заведующий лабораторией самоорганизации минеральных систем, доктор геолого-минералогических наук
Тел. 8 (1555) 79628
ivanyuk@geoksc.apatity.ru*

Kola Science Centre, Apatity

*P. M. Goryuainov, the major scientific worker, the Labor of mineral systems selforganization, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor
Tel. 8 (1555) 79250
pgor@geoksc.apatity.ru*

*G. Yu. Ivanyuk, the lieder of the Labor of mineral systems selforganization, doctor of Geological and Mineralogical Sciences
Tel. 8 (1555) 79628
ivanyuk@geoksc.apatity.ru*