

П.М.Горяинов, Д.Г.Егоров, Г.Ю.Иванюк

## ЖЕЛЕЗОРУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА КАК САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ\*

*Рассматриваются архейские железорудные формации, которые обладают масштабным самоподобием, сочетанием хаотичности и упорядоченности на разных масштабных уровнях, когерентностью признаков формально различной природы, фрактальностью, т.е. признаками, характерными для детерминированно-хаотических систем. Применение специальных методов теории динамических систем позволило получить количественную меру сложности динамики рудогенеза.*

*Study of the Archean banded iron formations at Kola peninsula shows that their structures have self-similarity, combination of chaotic and ordered elements on various hierarchical levels, coherence between features with formally different nature. In the whole, these formations are fractals and their parameters are typical for determinated chaotic systems. The quantitative measurement of complication - as a property of the ore-forming process dynamics - has been worked out by application of some methods from the dynamic systems theory.*

Генезис докембрийских полосчатых железистых формаций, к которым относятся месторождения Кольской железорудной провинции, вот уже много лет является объектом непрекращающейся дискуссии. Однако при обилии различных генетических гипотез общим для всех них было то, что железорудные месторождения Кольского полуострова (как и многие другие геологические объекты) рассматривались как пассивные системы, структурируемые (деструктурируемые) внешними силами. Нами они рассматриваются с точки зрения теории самоорганизации (синергетики). Интересно привести здесь мнение лауреата Нобелевской премии И.Р.Пригожина: "Недавно идеи неравновесной физики нашли многообещающие приложения в области геологии. Во многочисленных геологических отложениях для целого ряда пространственных масштабов наблюдается занятая регулярность структур: метаморфические слои и т.д. Согласно традиционным взглядам, эти структуры объясняются "последовательными" явлениями. Однако выясняется, что более удовлетворительной является интерпретация, основанная на представлениях о нарушении симметрии за счет переходов, вызванных неравновесностью системы. Если такая точка зрения в дальнейшем подтвердится, то это очень сильно повлияет на интерпретацию происхождения многочисленных геологических отложений" [12, с.54].

Примером науки, изначально ориентированной на изучение диссипативных систем, является биология. Наиболее очевидной особенностью биологических систем является их способность к самоорганизации, т.е. спонтанному образованию и развитию сложных упорядоченных структур [9]. Это не противоречит законам термодинамики, поскольку живые системы не являются замкнутыми. Энтропия, служащая мерой беспорядка, может уменьшаться в открытых системах благодаря уходу энергии в окружающую среду. Необходимая предпосылка эффектов самоорганизации заключается, кроме того, в наличии потока энергии, поступающего в систему от внешнего источника. Именно благодаря этому потоку система становится активной, т.е. приобретает способность к автономному образованию структур. Очевидно, что эффекты самоорганизации не могут быть исключительным свойством биологических объектов, а должны наблюдаться и в системах неорганического происхождения. Для раздела науки, занимающегося исследованием базовых математических моделей активных сред, Г.Хакеном был предложен термин "синергетика" (дословно с греческого: совместное действие) [14]. Поскольку главным отличительным свойством активных

\* Работа выполнена в рамках проектов 94-05-16232а и 96-05-64402 РФФИ.

сред (диссипативных систем) являются протекающие в них процессы самоорганизации, синергетику можно также рассматривать как общую теорию самоорганизации в активных средах различной природы.

Рассмотрим примеры, иллюстрирующие синергетическую естественно-научную парадигму. Поместим лист бумаги над источником тепла. Нагреваясь, лист изогнется с образованием складок. Аналогичные складки можно получить также на другом листе бумаги, просто смяв его руками. В том и в другом случаях результатом мы имеем складчатость, образовавшуюся за счет прихода энергии извне, разница же в том, что при смятии руками система пассивно деформируется (так, как предписывают силы извне), а при нагревании структура меняет форму в соответствии со своими внутренними свойствами: теплопроводностью, жесткостью и т.д. Энергия подводится извне, но форма и амплитуда складок определяются свойствами самой системы.

Перейдем теперь на собственно геологическую территорию и поставим мысленный эксперимент: предположим, что гипотетическое геологическое тело испытало энергетическое воздействие, приведшее к конвекции по механизму Бенара (или иному самоstructuring). Затем процесс закончился, результаты его "заморозились" и его посетили специалисты по структурному анализу. Произведя замеры сланцеватости, углов падения складок и чего-нибудь еще, они создали стройные, возможно, даже согласующиеся друг с другом схемы того, как это тело под воздействием внешних сил сжималось, изгибалось в складки нескольких генераций, иначе говоря, участвовало в процессах, происходивших большей частью только в воображении этих структурных аналитиков. Безупречная логика структурного анализа порождает в нашем предполагаемом случае результат, не имеющий отношения к реальности. Почему это произошло? Потому что весь структурный анализ молчаливо подразумевает, что мы имеем дело с пассивными системами.

Общеизвестно, что два разных геолога, как правило, составляют на одном объекте разные карты, структурные схемы и т.д. Причиной могут быть не столько расхождения во взглядах на природу исследуемого объекта, сколько принципиальная неполнота фактов, доступных исследователям. Часто, однако, бывает, что дать логически непротиворечивую интерпретацию геологического строения объекта мешает как раз избыток фактов; в этом случае вопрос, соответствует ли природа системы методам ее изучения, перестает быть праздным.

Классическую (но далеко не единственную) ситуацию подобного рода представляет железисто-кремнистая формация Кольского полуострова. Воистину огромный объем имеющейся информации до сих пор не внес ясности в проблему ее происхождения. Причиной этого является наличие признаков, одна часть из которых отвечает представлениям о вулканогенно-осадочном с последующим метаморфизмом образования кварцитов, другая - о метасоматическом, третья - о метаморфогенном.

Рассмотрим подробнее реальные тела железистых кварцитов. На рис.1 представлен фрагмент одного из них от контакта с гнейсами до центральной части. Часть тела до другого контакта симметрична представленной на рисунке. Прежде всего бросается в глаза сходство рисунка складок с классической картиной турбулентного потока в плоском канале [7]: возле стенок поток всегда ламинарный, в переходном слое турбулентность возникает в ограниченных облачках, характеризующих зону перемежаемости, затем идет зона крупномасштабных вихрей, сменяющаяся к центру потока зоной мелкомасштабной турбулентности. Видно, что реальное тело кварцитов характеризуется весьма похожим распределением складок.

Анализ магнитной анизотропии кварцитов показал, что наблюдается два принципиально различных ее вида: 1) векторы намагниченности зерен лежат в плоскости слоистости и значение угла между направлениями намагниченности зерен магнетита и полосчатостью равно нулю; 2) векторы намагниченности направлены к поверхности слоистости под углами, близкими к  $45^\circ$  [4, 10]. Одномодальные распределения характерны почти исключительно для прямополосчатых кварцитов; 90 % образцов, у которых установлено наличие магнитной анизотропии второго типа, - пloyчатые. Согласно теории самоорганизации [12, 14], переход от одно- к двумодальным распределениям отражает появление согласованности в поведении

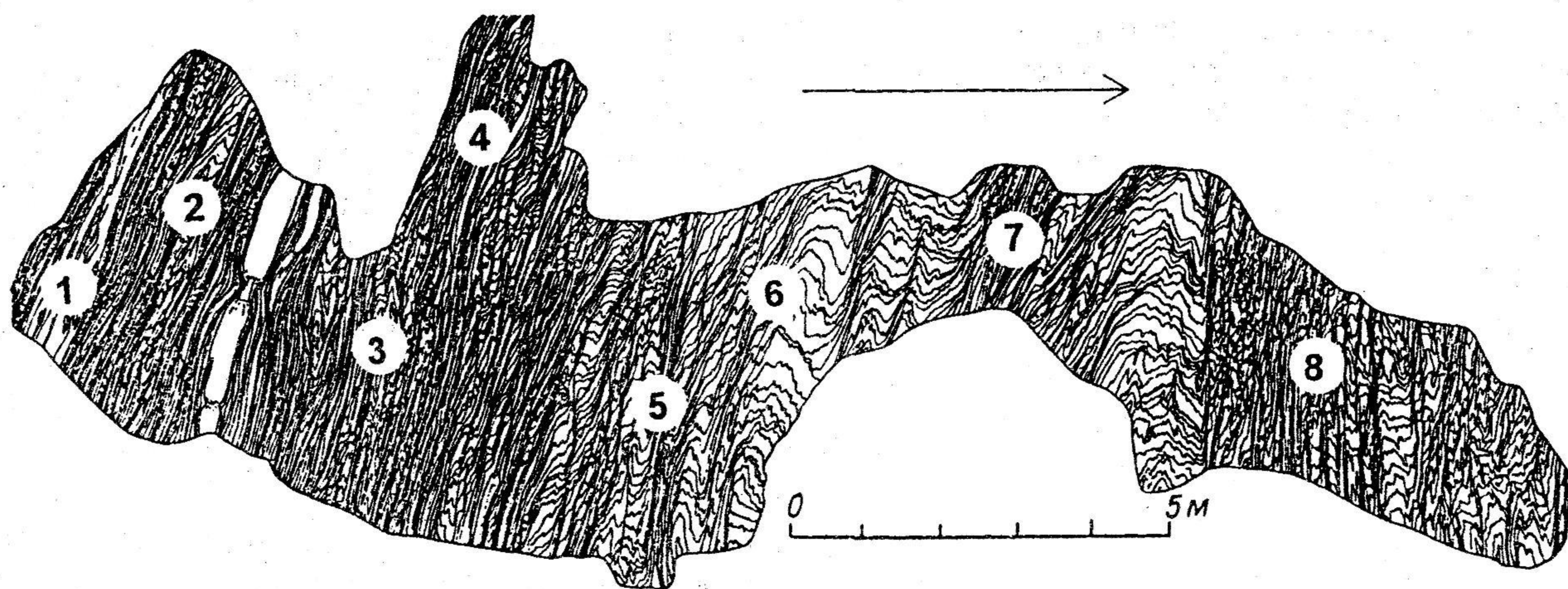


Рис.1. Текстурные особенности железистых кварцитов Печегубского месторождения. Стрелкой указано направление к центру рудного тела; 1-8 - места отбора проб

подсистем (в данном случае - магнетитовых зерен). Это есть не что иное, как стохастический аналог бифуркации [12].

Итак, с точки зрения классической геологии складкообразование хаотизирует первоначальную плоскостную магнитную анизотропию плоскостных сред. Здесь же мы имеем дело с парадоксом: налицо упорядочение, сопровождающее хаотизацию.

Складкообразование сопровождается весьма нетривиальным изменением состава магнетита, когда происходит возрастание содержания какой-либо микропримеси, если ее изначальное содержание было меньше определенной величины  $S$ , и уменьшение, если количество этой примеси превышало  $S$ . Величина  $S$  составляет 0,07 % для Mn, 0,04 % для Mg, 0,07 % для Al и Si, т.е. в фазовом пространстве химических компонентов возникает своеобразный аттрактор, "притягивающий" составы магнетита.

Рассмотрим график (рис.2) с изменениями вдоль уже знакомого нам обнажения от контакта рудного тела к его центру самых различных величин: углов раскрытия складок в кварцитах  $\phi$ , магнитной анизотропии  $\alpha$ , содержаний различных оксидов в составе пород. Видно, что, несмотря на различную природу, все они изменяются когерентно, причем уже первая компонента факторного анализа, включающая все эти величины, отражает 79 % изменчивости данных. Оценка информационной энтропии микроструктур прямополосчатых и пloyчатых кварцитов Печегубского месторождения также показала большую упорядоченность последних [5].

Таким образом, если бы складкообразование было обычным деструктивным процессом, как это обычно полагают, оно не могло бы сопровождаться упорядочением текстур, анизотропии намагниченности, химических составов магнетита и кварцитов. Наоборот, в системах, где хаос детерминирован, хаотичность на одном масштабном уровне прекрасно сочетается со сверхорганизованностью на другом. Более того, как показано Ю.Л.Климонтовичем [6], состояние детерминированного хаоса характеризуется большей упорядоченностью, чем предшествующее ему нехаотическое состояние. Однако все еще остается открытым вопрос, являются ли все эти свидетельства всего лишь некоей экзотической игрой природы и каково значение этих чрезвычайно интересных наблюдений на макрогеологическом (тектоническом) уровне.

В настоящее время общепризнано, что слоистость железистых кварцитов имеет многопорядковое строение [2, 8, 11]. Данное заключение в полной мере относится и к пространственному распределению магнетита в телах железистых кварцитов. Графики изменения содержания минерала вкост слоистости весьма редко имеют четко выраженный периодический или квазипериодический характер, обычно же они выглядят совершенно

случайными. Однако если построить аналогичные кривые в других пространственных масштабах, то обычно все они оказываются подобными друг другу. Фактически, это пример фракталов (точнее, их специфической разновидности - хаотических фракталов) - геометрических объектов, состоящих из взаимоподобных фрагментов различной величины [13].

Геометрические фрактальные структуры часто представляют собой продукты нелинейных хаотических процессов, хотя однозначной связи между ними пока не установлено [1]. Основным препятствием на этом пути является неясность соотношения временной эволюции системы и порождаемых ею пространственных образований. Тем не менее, обнаруживая определенную закономерность в последовательности значений какой-либо величины в пространстве, можно говорить о наличии подобной закономерности в соответствующей временной (пространственно-временной) последовательности состояний системы. Как показано Ф.Такенсом, длинная последовательность значений одной переменной процесса позволяет восстановить некоторые его динамические свойства (подробнее см. [12, 15]). Полученный нами при применении этой методики результат [3] свидетельствует о детерминистском характере динамики рудообразующей среды, описываемой странным аттрактором фрактальной размерности. Вся сложность распределения магнетита в рудном теле вызвана взаимодействием ограниченного и довольно небольшого числа переменных.

Таким образом, полученные нами данные свидетельствуют, что структуры, подобные рассмотренным нами железорудным толщам, не могут рассматриваться как пассивные объекты. Если учесть, что классическая тектоника до сих пор не делает исключений из наблюдаемого разнообразия объектов тектоносферы: они все попадают в раздел вынужденных или пассивных структур, - вышеприведенный вывод оказывается крайне важным для понимания того, насколько неадекватны могут быть следствия совершенно казалось бы логически корректных современных тектонических построений. По крайней мере, очевидно, что:

• во-первых, любые процедуры реконструирования "исходного" состояния, по-существу состояния термодинамического нуля, для диссипативных структур некорректны, ибо система утрачивает память об этом состоянии и "помнит" только

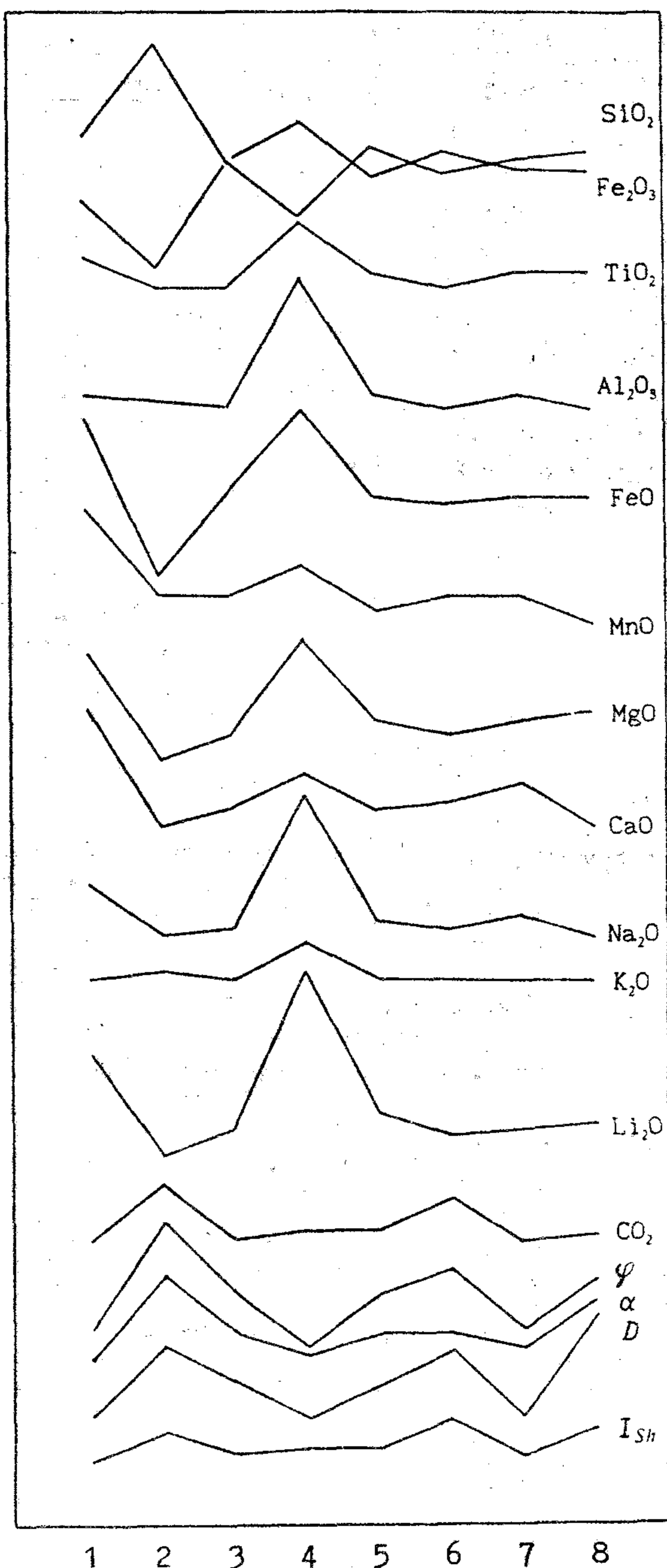


Рис.2. Изменение химического состава железистых кварцитов, угла раскрытия складок  $\varphi$ , ориентировки векторов намагниченности  $\alpha$  зерен магнетита, фрактальной размерности складчатости  $D$  и степени упорядоченности микроструктур по Шеннону  $I$  от приконтактной части рудного тела (см. рис.1) к его центру; 1-8 - номера проб

точку скачка, когда тектонический ансамбль имеет почти законченный структурированный вид;

♦ во-вторых, когерентность, как следствие кооперативного поведения элементов и подсистем, не оставляет возможности для осуществления "координатного" анализа - ни количественных оценок амплитуд тектонического транспорта в так называемых вязких потоках, ни степени деформированности ансамбля;

♦ в-третьих, принцип симметрии Кюри, на котором основан структурно-тектонический анализ, в его ортодоксальной формулировке ("симметрия причины не может быть выше симметрии следствия"), также не отвечает рассматриваемому классу структур; это означает, что любые генерализованные схемы предпочтительных ориентировок не отвечают симметрии анизотропной среды приложенных извне сил; поэтому теряют геологический смысл модели, основанные на геометрическом анализе, в котором фигурируют понятия векторов сжатия-растяжения, положения источников тектонических механизмов, сил и транспорта.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. М.: Мир, 1991. 368 с.
2. Горяинов П.М., Балабонин Н.Л. Структурно-вещественные парагенезисы железных руд докембрия Кольского полуострова. Л.: Наука, 1988. 144 с.
3. Горяинов П.М., Егоров Д.Г., Иванюк Г.Ю. О структурно-вещественной самоорганизации в архейских железорудных ансамблях (Кольский полуостров). // ДАН. 1992. Том 322, № 6. С. 1123-1127.
4. Иванюк Г.Ю. Магнетит как индикатор симметрии поля напряжений при формировании железистых кварцитов // Минералогический журнал. 1991. № 2. С. 78-83.
5. Иванюк Г.Ю., Егоров Д.Г. Складкообразование в железорудных системах как детерминированно-хаотический процесс // Структурные исследования кристаллических образований: Тез. докладов / Ин-т геологии и геохронол. докембрия РАН. СПб, 1992. С. 48-49.
6. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. М.: Наука, 1990. 320 с.
7. Конт-Белло Ж. Турбулентное течение в канале с параллельными стенками. М.: Мир, 1968. 195 с.
8. Кулик Д.А. Типы ритмической полосчатости пород Саксаганской свиты Криворожского бассейна / ИГФМ. Киев, 1986. 64 с.
9. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. М.: Наука, 1990. 270 с.
10. Нагата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир, 1965. 341 с.
11. Николаев А.П., Горяинов П.М. Дифференцированность метаморфических пород как отражение их упорядоченного строения // Геология и геофизика. 1990. № 11. С. 86-93.
12. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1988. 240 с.
13. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.
14. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 406 с.
15. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988. 240 с.