

СКЛАДКИ И СКЛАДЧАТОСТЬ – КЛЮЧЕВЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕКТОНИКИ (НА ПРИМЕРЕ АРХЕЙСКИХ УЛЬТРАМЕТАМОРФИТОВ).

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.

Статья 1

П. М. Горяинов, Г. Ю. Иванюк

КНЦ РАН, Анатиты

Поступила в редакцию 15 сентября 2011 г.

Аннотация. Базой доктрины складкообразования до сих пор остается твердое убеждение в том, что деформируемая матрица пассивно реагирует на внешние воздействия. Это отражено как в механических и численных экспериментах, так и в логических (словесных) трактовках натурных наблюдений. Вполне ожидаемым результатом пассивной реакции на воздействия извне оказывался симметричный отклик. На этом постулате базируется и весь (!) современный структурный анализ. Но в многообразии складок в железистых кварцитах доминируют производные процессов самоорганизации, а учитывая волнообразный характер рассматриваемых узоров – процессов автоволновой динамики.

В случае нелинейного отклика вещества складок на внешнее воздействие традиционный структурно-тектонический анализ утрачивает смысл.

Ключевые слова: самоорганизация, автоволновая складчатость, железистые кварциты.

Abstract. Base of the foldforming doctrine there is till now a considered opinion that the strained matrix reacts passively to external actions. It is reflected both in mechanical and numerical experiments, and in logic (verbal) treatments of natural observations. The symmetric response is quite expected result of passive reaction to influences from the outside. All modern structural analysis is based on this postulate also. But the derivatives of processes of selforganisation dominates in variety of folds in banded iron formations. The wavy character of folded patterns testify to the autowave dynamics processes. The traditional structurally-tectonic analysis loses sense in case of the nonlinear response of substance to external influence.

Key words: selforganization, autowave folding, banded iron formations

Введение

Складки и складчатость, линзы, разломная сеть – это те явления минеральной природы, которые с зарождения геологии как науки привлекали внимание очевидностью модельного ряда трактовок на основе физического осмысления. Поэтому наряду с некоторыми другими они становятся каноническими объектами, как анализа, так и профессионального образования. Особенно ярко и типично они выражены в ультраметаморфитах и, прежде всего, в железистых кварцитах. Но даже после длительного совершенствования средств механического, а затем и численного моделирования, всякий раз выяснялось, что очередное осмысление является кажущимся. Оно происходило и происходит в границах навязываемых Природе схем возникновения складчатых и других узоров из нескладчатых. В этой статье мы коснемся прежде всего этого вопроса.

© Горяинов П. М., Иванюк Г. Ю., 2011

«Очевидная» задача повторить природный складчатый узор обусловила появление столь обширного массива экспериментальных работ, который в других областях естествознания обычно сопровождался заметным прогрессом в приросте качественно нового фундаментального знания. Пристальное внимание к проблеме и обилие попыток решить ее экспериментальным путем к ожидаемому приросту этого знания в структурной геологии и геотектонике не приводит вот уже на протяжении почти 100 лет. Обилие публикаций отражено в работах и отечественных тектонофизиков и структурщиков. Назовем работы М.В. Гзовского с его пятью принципами «теории» подобия в моделировании процессов разрушения и деформаций [5], а также ряд других работ [6, 7, 20, 24]. Не были исключением и работы 50–70-х годов группы В.В. Белоусова [16, 19], принципиально не отличавшиеся по выводам от самых современных работ европейских и американских центров.

Фундаментальной базой доктрины структурообразования («деформаций») все это время оставалось твердое убеждение в том, что деформируемая матрица пассивно (!) реагирует на внешние воздействия, как бы они ни выглядели, будь то механический и численный эксперименты, или даже словесная трактовка натуральных наблюдений. Вполне ожидаемым результатом пассивной реакции на воздействия извне оказывался симметричный отклик. На этом постулате базируется и весь (!) современный структурный анализ: в случае нелинейного отклика вещества складок традиционный анализ утрачивает смысл.

Но когда речь заходила о том, передают ли имитационные картинки экспериментов в неоднородно-пластичной (-вязкой, -упругой) основные свойства природных складчатых узоров, а, главное, – складчатых систем, становилось ясно: не передает. Не передает главное: разнопорядковый характер складчатых конструкций, о которых имели четкое представление прежде всего практические геологи, геологосъемщики, в частности, но не физики-экспериментаторы.

Региональная геология и ее инструмент – геологическая съемка – располагала многочисленными данными об иерархическом характере складчатых узоров как в альпийских флишевых толщах, так и в докембрийских ультраметаморфических толщах. Такая знакомая, почти расхожая формула регионально-геологических текстов: «складки 1-го, 2-го, n-го порядков» – имела определенное фактурное обоснование. Авторы статьи сами ее иногда использовали, например, для описания сложноскладчатых железистых кварцитов. И так же, как большинство геологов, наивно полагали, что признаки самоподобия в организации складок на микроуровне обязаны повториться и на макроуровне. Из этой «формулы» следовали лишь намеки на возможность сложного смятия пласта, вызванного либо многократным приложением внешних усилий, либо, что очень нечасто, – особой реакцией матрицы на те же воздействия. Такая «очевидность» не опиралась на внятное физическое осмысление особенностей ни того, ни другого. Скорее всего, поэтому таких многопорядковых складчатых узоров не удавалось получить в воспроизводимых экспериментах. Не удалось их получить, например, Рамбергу с его широко известными, даже популярными опытами по гравитационной симуляции слоев на центрифуге [21, 29]. Последнему, кстати, принадлежит весьма популярная версия о том, что селективный продольный изгиб составных слоев с контрастными

свойствами материала провоцирует образование серии знакопеременных изгибов – некоей весьма условной имитации многопорядковых складок. Думается, в качестве вынужденного компромисса, очень многие предлагают рассматривать разноразмерные изгибы в экспериментальной серии складок как проявление искомого иерархического порядка, столь свойственного реальным складчатым ансамблям. Предпринимались и иные экспериментальные попытки достичь такого эффекта. Мы предпочли опустить их содержательное описание.

Оставалось еще раз обратиться к вполне очевидным и вполне воспроизводимым свойствам реальных ансамблей самого разного масштаба и состава и рассмотреть эти свойства совсем с других позиций. Странно то, что эти свойства всегда были на виду, но системному анализу ни разу (!) не подвергались. Причина довольно проста: они не находили физического осмысления в рамках традиционной детерминистской идеологии, иначе говоря, – в рамках пассивной, вынужденной механики. Деформационный принцип трактовки складок и складчатости подразумевал, что последняя является хаотизирующим фактором в структурной эволюции геологических структур.

В действительности многое, если не сказать больше, обстоит совсем наоборот, что мы попытаемся показать. Наше внимание будет привлечено, прежде всего, к различиям в свойствах складок, полученных в эксперименте путем достижения пассивной реакции матрицы на внешнее воздействие от свойств складок и складчатых узоров, наблюдаемых в природных ассоциациях, т. е. в активных средах.

И, естественно, нас привлекает возможность оценить распространенность этих иных, «не-пассивных», т.е. активных, складчатых структур в литосферных процессах и конструкциях. Последние, естественно, могут быть связаны лишь с процессами самоорганизации. Волнообразный же характер самих узоров таких складок определяет их природу как автоволновую.

Складчатые узоры в пассивных и активных средах

Как ни покажется парадоксальным, но данная тема одновременно и проста, даже тривиальна: современная геотектоника и структурная геология рассматривает складки исключительно как производные пассивной среды – по умолчанию (!), что на самом деле никогда не было подтверждено. Как, впрочем, до недавнего времени и не опровергнуто,

а принималось как аксиома. Но тема и сложна, поскольку складки в пассивной среде все-таки иногда зарождаются и их можно наблюдать. Это, например, складчатые пакеты гравитационного оползания, это разнообразные складки-штампы. Но диапазон реальных ансамблей с подобными структурами исключительно узок, ибо сами по себе такие складки в природе – экзотика, в отличие от роли складчатости в доминирующих базовых установках геотектоники и структурной геологии, ориентированных на складчатые системы от архея до кайнозоя.

Пассивные (они же *вынужденные*) структуры, или *штампы* [4] физики выделяют в особую группу. К ним вплоть до недавнего времени относили все геологические объекты.

Вынужденные структуры очень близки к равновесным в том смысле, что их эволюция определяется пассивным стремлением к переуравновешиванию (в частности, при равновесном росте кристаллов) вслед за некоторыми изменениями во внешней среде. Практически весь «исторический» геологический анализ построен на логике равновесной термодинамики, т.е. на принципе возрастания энтропии по мере накопления в системе деформаций со временем, иначе – хаотизации. Образно говоря, к вынужденным структурам применим «принцип» известного финского геолога Я. Седерхольма, провозглашенный им более 100 лет назад: «у старого солдата больше шрамов, чем у молодого». Это, как предполагается, дает возмож-

ность вычислить точку так называемого «термодинамического нуля», из которого, якобы, и начала эволюционировать, «деформироваться» (т.е. «деградировать») данная система.

Как же современная геология рекомендует обращаться с пресловутой «точкой нуля»? Путь один и он четко вписан в анализ структурной эволюции сложной тектонической системы. Его суть в последовательном «снятии» все более древних преобразований (гипергенных, эрозионных, тектонических, метаморфических, и даже диагенетических, – это становится уже не столь важным). На этом принципе до сих пор строятся практически все геологические модели генезиса: некогда возникнув, геологический объект в дальнейшем лишь преобразуется, деформируется, разрушается и задача исследователя – отыскать в этих «руинах» те самые, чаще всего гипотетические первичные признаки, которые и укажут на условия зарождения данного объекта. Этот «теоретический» принцип или идеологический стержень тектонического редуционистского подхода – восстановление «дотектонических» обстановок с помощью так называемых палинспастических реконструкций.

Простейшая имитационная модель получения складчатого узора из нескладчатого мы уже комментировали [8, 9]. Она напоминает известную процедуру пекаря [23], где каждая новая итерация смятия приближает систему ко все большей хаотичности (рис.1).

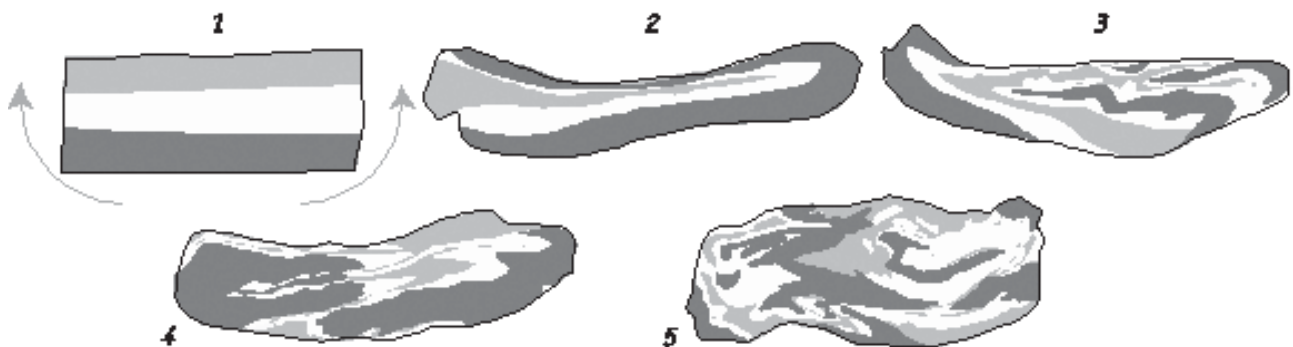


Рис. 1. Пластилиновая модель формирования сложноскладчатого узора в процессе многократного смятия слоистой пачки (1) и превращения последней в складчатую структуру [2–5]. Эксперимент напоминает известную процедуру пекаря [23]

Именно такая эволюция нескладчатой серии воспринимается геологами как очевидная, а процесс восстановления «руин» (палинспастические реконструкции) и состоит в том, чтобы путем очевидных манипуляций, основанных на логике решения систем линейных уравнений, восстано-

вить из фазы 5 начальную фазу 1 (рис. 1). Даже для этих «линейных» моделей решение подобной обратной задачи выходит за возможности тривиальной процедуры. Для нелинейных же систем все решения не корректны в принципе. А именно, – складчатый рисунок в горных породах не несет

информации ни о первоначальном или промежуточном состоянии, ни о механизме возникновения рисунка.

Примером сказанному являются сложноскладчатые архейские железорудные формации, в которых собственно железорудная толща, фиксирующая четкое зональное строение гнейсового комплекса и имеющая микроскладчатую фактуру, не приводит к «перемешиванию» гнейсо-железорудных пакетов, а даже, наоборот, становится более упорядоченной (рис. 2).



Рис. 2. Соотношение вмещающих роговообманковых гнейсов и амфиболитов с рудными телами сложноскладчатых железистых кварцитов на месторождениях Приимандровского района (Кольский п-ов):

1 – Айварское месторождение, 2 – Кировогорское месторождение, 3 – месторождение им. проф. Баумана.

Серое – амфиболиты, светлое – глиноземистые гнейсы, черное – магнетитовые кварциты

На геологических планах рис. 2 видно, что, несмотря на различие структурных узоров, рудные ансамбли сложноскладчатых железистых кварцитов сохраняют осевое положение в идеальной, хорошо воспроизводимой зональности и интенсивная складчатость этого универсального правила не нарушает. Как-будто это не ранний архей!

Впечатляет и четко выраженная зональность на следующем – региональном – уровне. Как бы ни был прихотлив структурный узор железистых кварцитов с их характерной изошренной складчатостью, строение продуктивного разреза имеет универсальный характер. Железистые кварциты всегда (!) окаймлены «рубашкой» кислых гнейсов (лептитов, нодулярных биотито-силлиманитовых гнейсов и их разновидностями) и всегда располагаются в осевой части зональной пачки [9]. Этот природный эксперимент можно считать весьма успешным – он воспроизводится в виде универсально организованной зональности повсюду, где имеются представительные данные о разрезе продуктивной толщи. Не отталкиваясь от каких-либо генетических предпочтений ее трактовки (к примеру, ее можно рассматривать не только как традиционно аутигенно-осадочную), подобная устойчивая зональность – это поразительный феномен для архейских ультраметаморфитов, показывающий, что складчатость и образование вещественной зональности согласованы как по месту, так и по времени проявления. Они когерентны *изначально*.

Складчатость и вещество

Из примера, приведенного на рис. 1, следует, что вещество, размещенное в складчатом узоре, ведет себя пассивно. Оно как бы подчеркивает наличие симметрии между наблюдаемым узором и предполагаемыми векторами действия внешних сил. Подчеркнем еще раз, что анализ складчатых узоров любых типов опирается именно на эту динамическую модель, модель последовательного перемешивания, утраты исходной слоистой текстуры. Этот процесс отражен в названии «деформация», которое в общепринятой трактовке раскрывает суть представлений об этом типе эволюции, якобы приводящем к хаотизации (см. Введение).

Очень похожий, но даже еще более далекий от понимания реальных складчатых узоров вариант предпринимается в структурной геологии, когда для целей динамических реконструкций из структурно-вещественного комплекса «извлекаются» только компоненты структурного узора и анализируется симметрия последнего. При этом размещен-

ное в узоре вещество во внимание не принимается, как бы оно ни было дифференцировано. В.В. Алексеев в одном из выступлений [26], например, вполне ясно определил, что в ряду: параллельно-полосчатые – сложно-узорные текстуры энтропия Шеннона возрастает с усложнением узора. На этом основании он рассуждает, что система при этом хаотизируется, а складчатость, таким образом, является хаотизирующим фактором (см. выше). Применительно к реальной складчатости это могло бы означать, что все ее разновидности исчерпывались бы моделью смятия пластилинового пакета (см. рис. 1, фаза 1). Вывод В.В. Алексеева, как и многих его единомышленников, кроме того, нацеливает на такой результат реконструкции процесса, который предусматривал бы только пассивный отклик системы при возникновении складчатости. В терминах симметричного анализа это выглядит «просто»: система реагирует на внешнее воздействие так, что сохраняет симметрию внешнего воздействия. Тогда искомая реконструкция – это последовательное «распрямление» смятого пакета, последовательное устранение пассивных деформаций, симметричных внешним силам. Дело лишь в алгоритме реконструкции.

Но это далеко или даже совсем не так. Скорее всего, такой тип динамической эволюции складчатых систем – это всего лишь очень частный случай из всего того структурно-тектонического многообразия, какое попадает в поле нашего зрения.

Впервые этот вывод прозвучал в нашей работе, посвященной анализу последовательности данных о составе железистых кварцитов по результатам опробования рудного интервала (кажущаяся магнитная восприимчивость – КМВ, которая связана с концентрацией магнетита положительными линейными зависимостями) [10]. Фазовый портрет, построенный по методу Такенса, отражает сложную, хаотическую динамику кристаллизации магнетита, с едва уловимыми признаками цикличности. Для уточнения топологии этой сложной траектории мы воспользовались алгоритмом Грассбергера-Прокаччия [9, 10]. Мы опускаем подробности и отсылаем к деталям практического использования этого аппарата, описанного в этих наших публикациях. Анализ сложной хаотической динамики показал, что анализ последовательности данных КМВ обнаружил внутреннюю корреляцию в организации толщи. И если связывать шумовую составляющую с наложенными процессами (например, с дайками пегматитов и диабазов, внутренними разрывами), то размерность ее графика ведет себя

аналогично поведению всей динамической системы. То есть, это исследование позволяет отклонить общепринятое представление о наложенном характере не только складчатости, но и метасоматоза и других якобы вторичных процессов при формировании железорудных месторождений Кольского полуострова. Они все составляет сложный сценарий процесса самоорганизации элементов состава с элементами узора. Это единственный, но весьма убедительный, путь для объяснения складчатого узора автоволновыми процессами.

Но еще более наглядна упорядочивающаяся роль складчатости в эксперименте по изучению векторов намагниченности магнетита из складчатых и параллельно-слоистых железистых кварцитов. Выясним, как изменяются свойства главного рудного минерала по мере перехода от нескладчатых магнетитовых кварцитов к складчатым, как изменяются при этом его структурная (магнитная анизотропия) и вещественная организация (к примеру, – состав). Приводим краткое описание эксперимента.

В ранних работах Г.Ю. Иванюка магнитная анизотропия характеризовалась углом α между статистическим направлением (или направлениями) намагниченности магнетитовых зерен и полосчатостью с помощью жидких кристаллов (рис. 3).

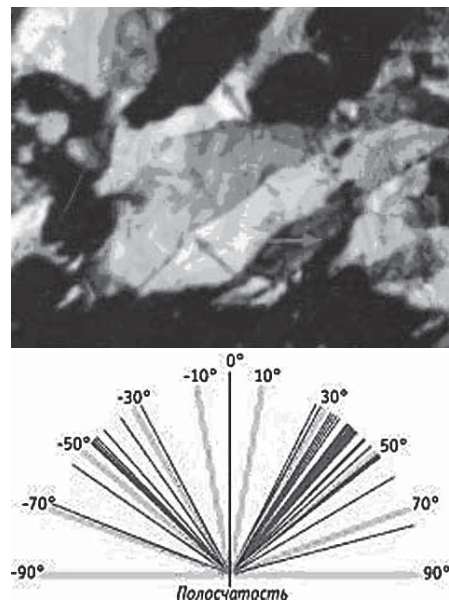


Рис. 3. Определение направлений намагниченности зерен магнетита в аншлифе железистых кварцитов при помощи нематических жидких кристаллов МББА [31]. Отраженный свет, николи скрещены, введен компенсатор $\nu\gamma/\lambda$. Ниже показана диаграмма распределения векторов намагниченности относительно полосчатости ($\alpha = 0^\circ$)

Определение направления намагниченности зерен магнетита проводилось при помощи нематических жидких кристаллов [14, 31] в плоскости *ac* шлифов железистых кварцитов. Дело в том, что если нематический жидкий кристалл, например МБА (4-метоксибензидилен-4-бутиланилин), поместить во внешнее магнитное поле, то бензольные кольца его палочкообразных молекул $\text{CH}_3-\text{C}_6\text{H}_4-\text{N}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}_4\text{H}_9$ будут стремиться ориентироваться так, чтобы силовые линии поля лежали в плоскости обоих бензольных колец. Поскольку оптическая анизотропия молекул МБА совпадает с их геометрической анизотропией, то этим устанавливается однозначная связь между направлением магнитного поля и оптической картинкой, наблюдаемой в поляризованном свете [12]. Количество измерений направлений намагниченности отдельных зерен для получения достоверной картины магнитной анизотропии в зависимости от степени равномерности выборки составляло от 40 до 120.

В изучаемых породах наблюдается два принципиально различных вида магнитной анизотропии: (а) когда векторы намагниченности зерен лежат в плоскости слоистости и $\alpha \rightarrow 0^\circ$ и (б) когда векторы намагниченности направлены к поверхности слоистости под углами, близкими к $\pm 45^\circ$. Соответственно, на гистограммах значений α в первом случае наблюдается единственный максимум, совпадающий с направлением полосчатости (рис. 4, а). При этом распределение значений α обычно оказывается близким к гауссовому и среднеарифметическая величина угла α (обозначим ее $\langle \alpha \rangle$) совпадает с его модальной величиной при $\alpha_0 = 0^\circ$: $\langle \alpha \rangle = 0^\circ 30' \pm 5^\circ 20'$. Во втором случае на вариационных кривых имеется два максимума, симметричных друг другу относительно направления полосчатости $\alpha_0 = 0^\circ$ (рис. 4, з). Модальные значения угла α здесь лежат в пределах $\alpha_a = +(40 - 60^\circ)$ и $\alpha_b = -(40 - 60^\circ)$ и не совпадают с $\langle \alpha \rangle$, по-прежнему близким к нулю. Так как максимумы симметричны друг другу относительно α_0 , для оценки их положения на вариационной кривой можно использовать следующую величину:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i^n |\alpha_i|}{n}$$

Среднестатистическое значение $\bar{\alpha}$ для бимодальных распределений векторов намагниченности равно $44^\circ 32'$. Иными словами, в среднем направление намагниченности составляет с направлением полосчатости угол, близкий к 45° . Изучение 92-х образцов железистых кварцитов показало, что

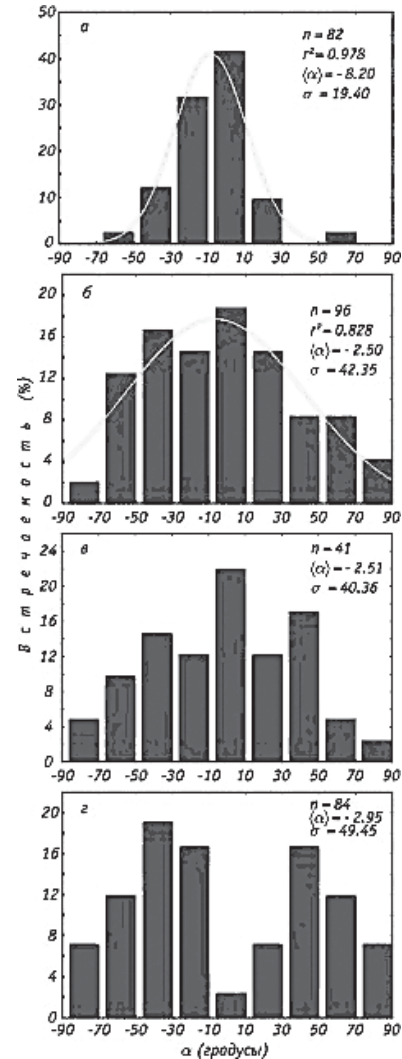


Рис. 4. Основные типы магнитной анизотропии железистых кварцитов (пояснение в тексте)

основная их часть характеризуется анизотропией второго типа с бимодальным распределением α . В меньшей части кварцитов установлена анизотропия первого типа с экстремумом при $\alpha_0 = 0^\circ$. Некоторое количество образцов характеризуется трехмодальными распределениями α с экстремумами при $\alpha_a = +45^\circ$, $\alpha_b = -45^\circ$ и $\alpha_0 = 0^\circ$ (рис. 5, в) и распределениями с единственным очень широким максимумом (рис. 4, б). Одномодальные распределения α характерны почти исключительно для прямополосчатых кварцитов: только 13 % таких образцов имеют плейчатую текстуру. Наоборот, 90 % образцов, для которых установлено наличие магнитной анизотропии второго типа, являются плейчатыми. В железистых кварцитах, где распределение намагниченности имеет трехмодальный характер (с экстремумами при $\alpha_a = +45^\circ$, $\alpha_b = -45^\circ$ и $\alpha_0 = 0^\circ$), плейчатые и прямополосчатые разновидности вполне закономерно представлены поровну.

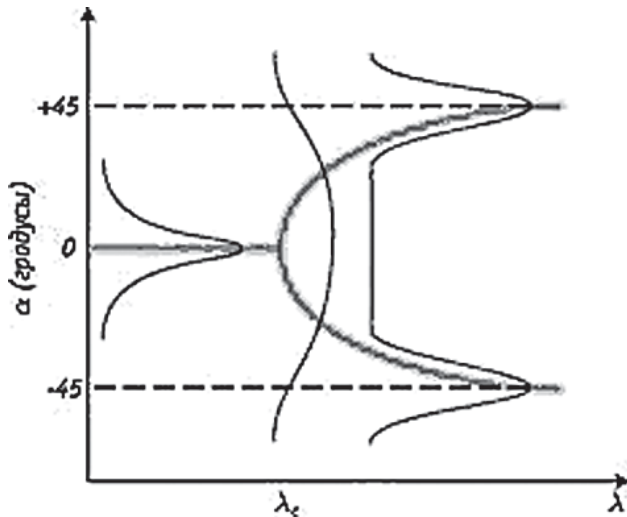


Рис. 5. Стохастическое выражение бифуркации векторов намагниченности магнетита. При переходе через критическое значение λ_c (некое внешнее воздействие) вероятностная функция одномодальной формы с единственным максимумом на единственном аттракторе (см. рис. 4, а) переходит сначала в плоское до равномерного распределение (см. рис. 4, б), а затем – в бимодальное распределение, максимумы которого совпадают с новыми аттракторами (рис. 4, г)

Известно [18, 23], что при равновесии в идеальной системе флуктуации абсолютно неупорядочены и в каждом отдельном наблюдении вероятность определенной флуктуации ничтожна. При этом дискретное распределение вероятностей отвечает закону Пуассона, непрерывное – гауссовому закону. Случай, когда стандартное отклонение такого распределения близко к нулю, означает, что имеется единственный острый пик вблизи среднего значения $\langle X \rangle$, обусловленный отсутствием в системе сколько-нибудь интенсивных флуктуаций. И наоборот, если стандартное отклонение существенно отличается от нуля – значит, флуктуации интенсивны.

В качестве меры взаимозависимости между намагниченностью различных зерен можно использовать ковариацию. Понятно, что в случае узкого одномодального распределения она обращается в нуль. Поэтому, можно полагать, что такие распределения векторов намагниченности отвечают равновесному состоянию данной системы. Наоборот, в плойчатых железистых кварцитах даже между наиболее удаленными зернами магнетита (т. е. на расстоянии до 2 см) ковариация α существенно отлична от нуля.

Известно, что бимодальное распределение не может быть представлено суммой независимых случайных переменных. Это указывает на *согласо-*

ванность переменных системы за счет перехода из состояния с единственным наиболее вероятным значением α_0 в состояние с двумя такими значениями α_a и α_b . В этом случае имеем стохастическое выражение бифуркации (рис. 5). И распределение α с единственным очень широким максимумом характеризуют собой саму точку бифуркации, где любые возможные флуктуации уже не гасятся, а их существование равновероятно [18, 23]. Развитие тримодальности распределений α отражает развитие бифуркации во времени и связано с «выбором» двух наиболее устойчивых целей эволюции системы, т. е. аттракторов.

Таким образом, переход от нескладчатой, параллельно-полосчатой к плойчатой текстуре железистых кварцитов – процесс типично бифуркационный. Этот переход не связан с накоплением деформаций по схеме пластилиновой модели (см. рис. 1), а вызван приобретением системой нового качества, большей упорядоченности при переходе ее через критическую точку динамической эволюции (точку бифуркации). Это означает, кроме того, что переход в складчатую форму происходит скачкообразно с приобретением системой максимальной когерентности переменных.

Об этом же говорит поведение свойств минералов, в частности магнетита при складкообразовании. Установлено, что переход от прямополосчатых пород к плойчатым сопровождается возрастанием упорядоченности практически всех его свойств посредством различных явлений самоорганизации. Выбор же типа магнитной анизотропии в железистых кварцитах определяется конкуренцией между «стратификационным» (в геометрическом смысле) и «деформационным» факторами.

Прямое отношение к пониманию физической природы складчатости имеет тот факт, что наведение магнитной анизотропии тесным образом связано с процессами окисления вещества ферромагнетиков. Признается, что возникновение термомагнитной анизотропии в ферритах вызвано тем, что при их окислении создаются вакансии и появляются возможности для диффузии ионов [22, 30]. Так, в железистых кварцитах оленегорских месторождений имеются две разновидности не-стехиометрического магнетита: железodefицитного (с частично переокисленной, маггемитовой, частью железа) и железозыбыточного, обогащенного вюститовой компонентой. Только в железodefицитном магнетите, таким образом, ионы двухвалентного железа получают возможность диффундировать в

энергетически выгодные позиции, создавая необратимую одноосную анизотропию (см. рис. 5). Косвенным подтверждением возможности такого процесса является и тот факт, что в плейчатых кварцитах весь магнетит представлен своей железодефицитной разновидностью [1, 9].

Выбирая в точке бифуркации «микроскладчатый» вариант, система самоорганизуется, т. е. усложняется, упорядочивается.

Таким образом, складчатость в железистых кварцитах приобретает упорядочивающий, а вовсе не хаотизирующий характер, т. е. является продуктом процессов самоорганизации. А учитывая извилисто-волнистый рисунок плейчатости в железистых кварцитах, можно утверждать на основании вышеприведенного эксперимента, что складчатость в архейских железистых кварцитах является производной автоволновых, а не пассивно-деформационных процессов [11, 13]. Не остается сомнений, что такую физическую природу имеет вся (!) складчатость в докембрийских комплексах, особенно в ультраметаморфических.

Фрактальный мотив в структурной организации складок в железистых кварцитах отражен на рис. 6.

Как показал анализ контуров кварцевого слоя в образце (рис. 6, слева и в середине), его размерность $D = 1,30 \pm 0,03$ (9) отличается от таковой типичной джеспилитовой плейчатости железистых кварцитов Криворожья ($D = 1.15$) (9). Рассматриваемая складка из магнетитовых кварцитов Урагубского месторождения (Северо-Запад Кольского полуострова) по своей изрезанности превосходит кривую Коха, приближаясь по этому параметру к дендритам. Не остается сомнений в том, что при ее образовании были задействованы диффузионные процессы, аналогичные таковым при росте дендритов. Характерный для процессов самоорганизации пример того, когда только геологический контур несет столь важную и содержательную информацию, какую невозможно получить никакими прецизионными изотопно-геохимическими исследованиями!

То обстоятельство, что данный структурный мотив характерен и для крупных тел железистых кварцитов, рудные тела которых фрагментированы на отдельные линзы, рис. 6, б), вносит решающий вклад в формирование термодиффузионной модели складчатости. И не только этой модели: возник-

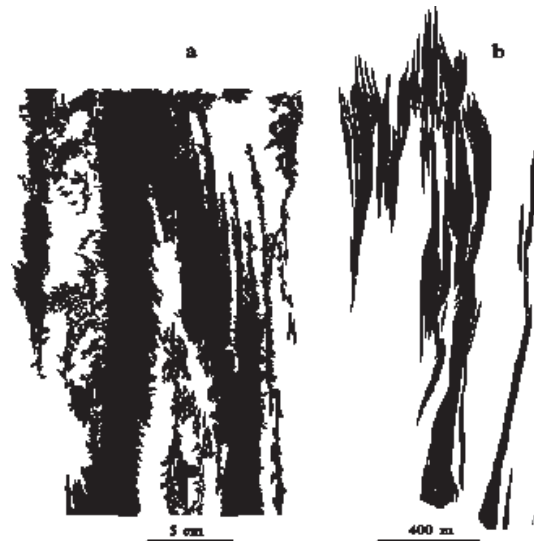


Рис. 6. Складка в грюнерито-магнетитовых кварцитах Урагубского месторождения (Кольский п-ов). Слева – фото большого прозрачного шлифа. В середине (а) – его схема с выделением черным цветом. Справа (б) контуры рудных тел грюнерито-магнетитовых кварцитов месторождения им. XXV годовщины Октября (Оленегорский район). Фрактальный характер узора с одинаковой структурой заполнения пространства в интервале от 0,05 до 400 м свидетельствует о его (узоре) происхождении в процессе самоорганизации с учетом термодиффузионных процессов, а не пассивного смятия и метаморфизма седиментогенных продуктов

новение складчатого узора оказывается тесно связанным с перераспределением вещества в диффузионных фронтах (скорее всего, даже инициировано им) и неотделимо от образования всего согласованного ансамбля, т. е. всей полосчатой железорудной формации с характерной для нее аутигенно-геохимической зональностью. Это обстоятельство может служить, что называется, решающим экспериментом Природы в создании уникального литосферного ансамбля. Он исключительно важен и для понимания железогенерации ПЖФ в архее в пользу термодиффузионных, а не седиментогенных процессов. А это кардинально меняет устоявшиеся представления о геоэкологии массового железоруднения в истории Земли, особенно в архее.

Эксперимент, подробно рассмотренный выше, не только интересен и оригинален, но легко доступен для понимания физической сути процесса перехода к складчатому узору. Он иллюстрирует механизм самоорганизации как физический процесс выбора типа магнитной анизотропии в процессе конкуренции между сильной анизотропией формы (вдоль слоев магнетита) и анизотропией второго типа (векторы остаточной намагниченности под 45° к магнетитовым слоям), наведение которой связано, вероятно, с касательными напряжениями. Именно этот последний характерен для плейчатых кварцитов. Однако в ее наведении непременно играют роль и процессы окисления магнетита [22, 30]. Эти авторы объясняли наведение анизотропии в ферритах тем, что при их окислении создаются вакансии и появляются возможности для диффузии ионов. Только в железодефицитном («окисленном») магнетите, таким образом, ионы двухвалентного железа получают возможность диффундировать в энергетически выгодные позиции, создавая *необратимую* одноосную магнитную анизотропию. Косвенно это подтверждается тем фактом, что в плейчатых кварцитах весь магнетит представлен своей железодефицитной разновидностью. Подсказка ответа на вопрос, почему касательные напряжения начинают играть определяющую роль только в плейчатых кварцитах, по-видимому, состоит в необычайной схожести строения рудных тел с геометрией турбулентного потока вязкой жидкости в плоском канале [9].

Понятно, что эти закономерности и явления нельзя напрямую применять к интерпретации геологических структур в виду очевидного различия микроскопических процессов «течения» горных

пород и жидкости. Однако как утверждает теория самоорганизации, несмотря на различную природу микропроцессов, способных привести к образованию диссипативной структуры (химические процессы, взаимодействие магнитных полей, гидродинамические неустойчивости, или, наконец, *складкообразование*), они протекают по единым макроскопическим законам.

Можно добавить, что инициализация складчатых узоров – это лишь первый этап формирования наблюдаемых складок. Мы не касаемся перераспределения рудного вещества из крыльев в замки, нагнетания его в ослабленные зоны, и всех тех возможных динамических процессов, характерных для структурно-метаморфических процессов. Но это поздняя стадия, следовавшая после зарождения неоднородностей в процессе термодиффузионных процессов (полосчатость) и взаимодействия процессов в ферромагнетиках (складчатость).

Интерпретация особенностей анизотропии пород и свойств магнетита из них позволяет понять, почему в ходе самоорганизации симметрия возникшего узора не определяется симметрией внешнего воздействия, на которой базируется традиционный (микро)структурный анализ, некорректность которого становится очевидной.

Автоволновая складчатость и ограничения для структурно-тектонического ретро моделирования

Другая часть затрагиваемой проблемы – это складки как канонические объекты традиционного геологического ретроспективного анализа, «успешность» которого опирается на отработанные «аксиоматичные» стандарты. Так сказать, на стереотипы успеха. Повторимся, что ни в одном случае экспериментальная имитация природной складчатости не повторила ее ключевых параметров или свойств, в частности, – фрактальности узоров со складками и ее информационными производными: масштабной инвариантностью и элементами дальнего порядка (когерентным поведением компонентов узора и компонентов вещества, состава). Все попытки эти свойства воспроизвести, подчеркивали лишь одну, чаще морфологическую, сторону, и не замечали или, что много хуже, – даже игнорировали другую, которая определялась когерентностью основных подсистем, прежде всего, параметров узора и параметров минерального состава в реальных складках. Откровенно говоря, то обстоятельство, что при огромном материале по симуляции

различных складок эта особенность не попадала в поле зрения ни практических геологов-структурщиков, ни экспериментаторов, свидетельствует, прежде всего, о кризисе парадигмы геологии, тектоники, в частности. Точно также эти важнейшие свойства геометрических узоров складок никак не учитываются существующими методиками структурно-тектонического анализа

Из рассмотренной в статье специфики реальных складок в архейских железистых кварцитах, специфики, проявленной универсально (!) практически во всем обозримом диапазоне масштабов [9], с очевидностью следует, что большая часть обсуждаемых в современной литературе свойств складок реальным складчатым ансамблям «навязана». Но поскольку, как выясняется, реальные складки не обладают навязанными им свойствами, а, напротив, имеют довольно нестандартный набор признаков, никогда (!) не рассматривавшихся структурной геологией, физическая адекватность таких реконструкций неудовлетворительна [2, 15, 25 и многие другие]. Физическая интуиция требует введения существенных ограничений для традиционного ретромоделирования. Назовем основные из них.

Во-первых, переход из нескладчатого в складчатое состояние осуществляется в природе после некоторого критического значения внешнего параметра λ , иначе – через точку бифуркации, т.е. скачкообразно. Это означает [18], что система перестает «помнить» все или почти все, что с ней происходило до этого. Любые (!) попытки восстановить начальное состояние являются некорректными. Система в точке бифуркации забывает его, хотя в сильной степени от него зависит.

Во-вторых, симметрия возникшей структуры не совпадает с симметрией внешней среды. Заметим, что воздействие может быть не только механическим, но и термальным, химическим, на уровне кристаллов и дислокаций в них, молекул и атомов. Отсюда все попытки восстановить симметрию силовых полей по симметрии наблюдаемого складчатого узора противоречат физической интуиции и, поэтому, некорректны.

И, наконец, *третье* замечание, очень важное с точки зрения обсуждаемой проблемы: автоволновая природа складчатости исключает необходимость сколько-нибудь существенного тектонического транспорта при образовании складчатых систем по довольно банальной схеме: в тылу зоны складчатого скупивания должно возникать так называемое нулевое тектоническое пространство, или обязательная тыловая зона растяжения. При автоволновой складчатости это вовсе не обязатель-

но. Остается сожалеть, что проблемы региональной и планетарной тектоники, активно обсуждаемые и решаемые с «помощью» громадных горизонтальных перемещений (например, часто в основе идеи – лежачие и колчановидные складки), оказываются надуманными, отвлекающими внимание и силы аналитиков от реальных, истинных, проблем. Популярные решения опираются только на пассивную модель складкообразования, модель вынужденного превращения слоистой толщи в складчатую. Поразительно, но ни в одном примере использования этих моделей пассивная природа складок не рассматривалась и не доказывалась, а принималась по умолчанию.

Заключение

Было бы совершенно логично с рассмотренных в статье позиций исследовать геологические узоры и структуру пространства не только архейских железорудных формаций, а геологического пространства, в котором сосуществуют и полосчатые, слоистые пакеты, и складчатые зоны, и линзовые серии и минерализованные разломные зоны. Являются ли эти типы структурного пространства продуктом наложенных тектонических процессов, т.е. деструкции слоистого пакета, либо это когерентные производные процессов тектонической самоорганизации? Несмотря на то, что авторы убеждены, что выявленные закономерности динамической эволюции складчатых конструкций в ультраметаморфитах, в железистых кварцитах, в частности, могут быть прослежены и в складчатых конструкциях мезозоя, было бы полезно изучить последние с помощью средств и подходов, использованных в настоящей статье. Крайне важно было бы выяснить, какое место во временном событийном ряду занимают процессы образования вещества многих других полосчатых формаций и их складчатого оформления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабонин Н. Л. О природе «голубоватого» магнетита из железистых кварцитов Кольского полуострова / Н. Л. Балабонин, Г. Ю. Иванюк // ЗВМО. – 1995. – № 3. – С. 61–77
2. Балаганский В. В. Крупномасштабные высокотемпературные пластические сдвиговые зоны в раннедокембрийских породах Кольского региона и их структурный парагенезис / В. В. Балаганский, Н. Е. Козлова // М.ГЕОС. – 1997. – С. 11–13.
3. Белоусов В. В. Основы структурной геологии / В. В. Белоусов. – М. : Недра, 1985. – 207 с.
4. Гапонов-Грехов А. В. Динамический хаос и структуры / А. В. Гапонов-Грехов, М. В. Рабинович // Вестник АН СССР. – 1988. – № 3. – С. 35–48.

5. *Гзовский М. В.* Основы тектонофизики / М. В. Гзовский. – М. : Наука, 1975. – 536 с.
6. *Гончаров М. А.* Механизм геосинклинального складкообразования / М. А. Гончаров. – М. : Недра, 1988. – 264 с.
7. *Гончаров М. А.* Введение в тектонофизiku: учебное пособие / М. А. Гончаров, В. Г. Талицкий, Н. С. Фролова. – Изд-во КДУ, 2005. – 495 с.
8. *Горяинов П. М.* Нелинейная тектоника. Содержание, объекты и принципиальные ограничения для интерпретации канонических случаев / П. М. Горяинов // Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1995.
9. *Горяинов П. М.* Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований / П. М. Горяинов, Г. Ю. Иванюк // М. ГЕОС. – 2001. – 312 с.
10. *Горяинов П. М.* О структурно-вещественной самоорганизации в архейских железорудных ансамблях (Кольский полуостров) / П. М. Горяинов, Д. Г. Егоров, Г. Ю. Иванюк // ДАН/1992. – Т/322. – № 6. – С 1123–1127.
11. *Горяинов П. М.* К построению синергетической модели железистых кварцитов докембрия (на материалах по железорудным месторождениям Кольского полуострова) / П. М. Горяинов, Д. Г. Егоров, Г. Ю. Иванюк // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38, № 9. – С. 1490–1496.
12. *Де Жен П. Ж.* Физика жидких кристаллов / П. Ж. Де Жен. – М.: Мир, 1977. – 215 с.
13. *Иванюк Г. Ю.* Фрактальные геологические среды: размерность, геологические типы, генетические следствия / Г. Ю. Иванюк // Физика Земли. – 1997. – № 3. – С. 21–31.
14. *Иванюк Г. Ю.* Метод нематических жидких кристаллов для исследования магнитных свойств минералов / Г. Ю. Иванюк, М. Г. Томилин // ЗВМО. – 1990. – № 3. – С. 95–98.
15. *Леонов М. Г.* Горизонтальные протрузии в структуре литосферы Земли / М. Г. Леонов // Геотектоника. – 2008. – № 5. – С. 3–36.
16. Методы моделирования в структурной геологии / В. В. Белоусов [и др.]. – М. : Недра, 1988. – 222 с.
17. *Миллер Ю. В.* Тектоно-метаморфические циклы / Ю. В. Миллер. – М. : Наука, 1980. – 160 с.
18. *Николис Г.* Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. – М. : Мир, 1990. – 344 с.
19. Очерки структурной геологии сложнодислоцированных толщ / под ред. В. В. Белоусова и В. В. Эза. – М. : Недра, 1977.
20. *Паталаха Е. И.* Тектоно-фациальный анализ складчатых сооружений палеозоя / Е. И. Паталаха. – М. : Недра, 1985. – 168 с.
21. *Рамберг Х.* Сила тяжести и деформации в земной коре / Х. Рамберг. – М. : Недра, 1985. – 399 с.
22. *Тикадзуми С.* Физика ферромагнетизма / С. Тикадзуми. – М. : Мир, 1987. – Т. 2. – 419 с.
23. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация / Г. Хакен. – М. : Мир, 1991. – 240 с.
24. *Шерман С. И.* Современные проблемы экспериментальной тектоники. Экспериментальная тектоника и полевая тектонофизика / С. И. Шерман. – Киев : Наукова думка, 1991.
25. *Эз В. В.* Складкообразование в земной коре / В. В. Эз. – М. : Недра, 1985. – 191 с.
26. *Alekseev V. A.* A quantitative measure of structural regularity / V. A. Alekseev // International on Fractal, and Dynamic Systems. In Geoscience. Frankfurt of Main., Germany. Book of Abstracts. – 1993. – P. 4.
27. *Ramberg H.* Evolution of pygmatic folding / H. Ramberg // Norsk Geologisk Tids-skrift. – 1970. – № 39. – P. 99–151.
28. *Ramberg H.* Fluid dynamics of viscous buckling applicable to folding of layered rocks / H. Ramberg // Bull. of the Am. Association of Petroleum Geologists. – 1963. – № 47. – P. 484–505.
29. *Ramberg H.* Selective buckling of composite layers with contrasted rheological properties. A theory for simultaneous formation of several orders of folds / H. Ramberg // Tectonophysics. – 1964. – № 1. – P. 307–341.
30. *Slonczewsky J. C.* Origin of magnetic anisotropy in $\text{Co Fe}_{3-x} \text{O}_4$ / J. C. Slonczewsky // Appl. Phys. – 1958. – № 3. – P. 448–449.
31. *Tomilin M. G.* The application of thin nematic liquid crystalline layers to mineral analysis / M. G. Tomilin, G. Yu. Ivanyuk // Liq. Crist. – 1993. – Vol. 14, № 5. – P. 1599–1606.

КНЦ РАН, Апатиты

П. М. Горяинов, главный научный сотрудник лаборатории самоорганизации минеральных систем, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Тел. 8 (81555) 79250
pgor@geoksc.apatity.ru

Г. Ю. Иванюк, заведующий лабораторией самоорганизации минеральных систем, доктор геолого-минералогических наук
Тел. 8 (81555) 79628
ivanyuk@geoksc.apatity.ru

Kola Science Centre, Apatity

P. M. Goryainov, the major scientific worker, the Labor of mineral systems selforganization, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor
Тел. 8 (81555) 79250
pgor@geoksc.apatity.ru

G. Yu. Ivanyuk, the leader of the Labor of mineral systems selforganization, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences
Тел. 8 (81555) 79628
ivanyuk@geoksc.apatity.ru