

© Г.Б. Наумов, 2008

Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва

## ЭНЕРГЕТИКА ПРОЦЕССОВ РУДООБРАЗОВАНИЯ\*

*Природные рудообразующие системы являются типичными открытыми диссипативными системами. Энергия, необходимая для их развития, может иметь источники, не связанные с таковыми для рудного вещества и осуществляться путем волновой ее передачи. Перспективы дальнейшего развития данного направления лежат в области объединения морской геологии и сейсмологии.*

В области структурно-вещественного изучения рудных месторождений накоплен огромный эмпирический материал, позволяющий искать новые подходы к его обобщению. Еще в начале 20-х годов прошлого столетия В.И.Вернадский писал о необходимости создания “науки будущего”, науки — изучающей “энергетику нашей планеты” [5]. Вопросы энергетики геологических процессов и сейчас стоят далеко не в центре внимания специалистов в области наук о Земле.

### Энтропия рудообразующих процессов

Уже из определения руды как горной породы с аномальным распределением отдельных компонентов видно, что возникновение рудных тел связано не усреднением, а с возникновением неоднородностей распределения элементов в земной коре. Следовательно, этот процесс, ведущий не к возрастанию, а к уменьшению энтропии в данном локальном объеме пространства не может протекать самопроизвольно.

Понятие энтропия введено Р. Клаузиусом в 1865 г. Людвиг Больцман связал энтропию системы с вероятностью ее состояния, доказал (1872) статистический характер второго начала термодинамики, дав ему свою формулировку: “*Природа в своих процессах стремится от менее вероятных состояний к более вероятным состояниям*”. Он вывел точную количественную связь между энтропией и упорядоченностью системы, которая выражается уравнением

$$S = k \ln D,$$

$S$  — энтропия,  $k$  — так называемая постоянная Больцмана, равная  $3,2983 \cdot 10^{-24}$  калорий на градус Кельвина;  $D$  — количественная мера неупорядоченности атомов в рассматриваемом теле. Неупорядоченность, которую она выражает, отчасти заключается в тепловом движении, отчасти в том, что атомы и молекулы разного сорта смешиваются чисто случайно вместо того, чтобы быть полностью независимыми (характеризует внутренние связи между атомами).

\* По материалам доклада на конференции “Синэргетика в геологии”.

Уравнение Больцмана хорошо иллюстрируется таким примером. Вода имеет три состояния: твердое, жидкое и газообразное. В кристаллической решетке льда молекулы  $H_2O$  имеют строго определенную упорядоченность. Расположение молекул в жидкости упорядочено значительно меньше. Наименее упорядочено расположение молекул в газе. Соответственно значение энтропии  $S^0$  льда — 10,5, жидкости — 16,7 и газа — 45,1 кал/(моль·град).

Действительно, природные тела более высокого уровня организации более упорядочены и характеризуются меньшей энтропией. Вещество в рудном теле более укрупнено и упорядочено, чем в окружающих горных породах. Такой процесс не идет самопроизвольно, а требует дополнительных затрат энергии. В ходе развития природы возникают все более и более организованные тела.

Изучая эволюцию земной коры, мы обычно анализируем пространственные и временные изменения ее вещества. Мы хорошо знаем, что по мере своего развития земная кора все больше и больше гетерогенизируется. Земная кора архея отличалась однообразием, пространственная дифференциация была относительно слабой. Постепенно увеличивалось петрографическое разнообразие — от преобладания плагиогранитов в докембрии к аляскитовым гранитам в мезозое и кайнозое. Дифференциация вещества отчетливо наблюдается в осадочных, метаморфических, магматических процессах. Все процессы рудообразования всегда связаны с дифференциацией совокупностей элементов и ассоциаций отдельных самостоятельных групп.

Попытки решить противоречия между требованием роста энтропии в самопроизвольных процессах и увеличением упорядоченности в ходе эволюции предпринимались неоднократно. Еще в 1902 г. Профессор Московского университета Н.А. Умов рассматривал способы сохранения *упорядоченных состояний*, особенности “*стройности*” и “*нестройности*” природных систем и существующие в природе универсальные способы сохранения *упорядоченных состояний* [24]. На языке современной науки — это попытка связать организованность природных систем с энтропией и информацией.

В.И. Вернадский в начале 30-х годов писал: “Энтропия мира обычно ставится как бы отдельно от остальных физических явлений, и из необратимости отвечающего ей процесса не делается необходимых логических выводов. ...Наше обычное представление о мире указывает, что в мире есть диссимметрия, проявляющаяся в существовании в нем энтропии. Энтропия указывает, что ...в пределах нашего геологического и даже космического времени характер энергии мира меняется всегда в одну и ту же сторону — увеличения тепловой энергии, не могущей больше проводить в мире работу” [6].

Внимательные натуралисты постоянно ощущали фундаментальное противоречие между требованием роста энтропии в самопроизвольных процессах и сохранением упорядоченных состояний реальных в реальных природных телах.

Попытку решить эти противоречия предпринял Д.С. Коржинский. Анализируя в рамках классической равновесной термодинамики механизмы формирования метасоматической зональности, он предложил рассматривать эти объекты как в целом неравновесные, но позволяющие говорить о термодинамическом равновесии в каждом отдельном элементарном участке, и ввел понятия о мозаичном равновесии и об *инертных* и *вполне подвижных компонентах*. Это дало возможность применить методы равновесной термодинамики к реальным телам, но не решало проблемы в целом.

### Диссипативные системы

Пути выхода из противоречия *порядок — беспорядок* намечает современная физика. Нобелевский лауреат Илья Пригожин (1917—2003) в работе “Философия нестабильности” отметил, что “порядок и беспорядок существуют как два аспекта одного целого”, а “стержневым моментом в таком восприятии становится представление о неравновесности” [22].

В идеальной равновесной системе газ полностью перемешан, в каждом ее участке соотношение легких и тяжелых молекул идентично. В реальной системе, находящейся в гравитационном поле, в верхней и нижней ее частях это соотношение будет различно. А ведь все окружающие нас системы находятся в поле тяготения Земли. Другой пример, приводимый И. Пригожиным: “если в две соединенные емкости поместить два газа, допустим, водород и азот, а затем подогреть одну емкость и охладить другую, то в результате из-за разницы температур в одной емкости будет больше водорода, а в другой азота. В данном случае мы имеем дело с диссипативным процессом”. Поскольку в разрезе земной коры существует геотермический градиент, приведенная модель в своей сути хорошо отражает природные реалии.

Строго говоря, любые реальные системы следует рассматривать с позиций доказанной И. Р. Пригожиным (1947) теоремы термодинамики неравновесных процессов: *при внешних условиях, препятствующих достижению системой равновесного состояния, стационарное состояние системы соответствует минимальному производству энтропии*. Именно такие соотношения и характеризуют энергетическое развитие природы как системы.

Состояние равновесия в любом случае остается тем предельным состоянием, к которому система будет стремиться при отсутствии внешних воздействий (если бы она была изолированной). Поэтому расчеты равновесных состояний всегда полезны хотя бы уже потому, что показывают некоторое модельное предельное состояние. Но траектория движения не детерминирована и, в конце концов, настолько запутывается, что предсказать движение системы в целом невозможно — это смесь стабильности и нестабильности.

Для того, чтобы решить какую-либо задачу, мы, вообще говоря, должны работать на трех уровнях. При исследовании конкретной системы необходимо учесть не только ее элементы, но и в какую большую систему

вписывается исследуемая, а также какие подсистемы работают внутри нее. То есть, должен быть трехуровневый анализ. Когда специалисты пытаются от знания какого-либо элемента внизу сделать заключение относительно большой системы, это приводит к неминуемым ошибкам. Этот путь работает только в первом приближении. Поэтому геолог, занимающийся процессом формирования руд, обязан хотя бы в общих чертах представлять, что происходит в системе большего масштаба.

Процесс рудообразования (как и многие другие геологические процессы) потому и антиэнтропийный, что он находится в более крупной диссипативной системе, дающей ему необходимую энергию. Суть противоречия, долгое время привлекавшего внимание натуралистов, — в ограничениях системы. В изолированной системе энтропия может только расти, в системе, взаимодействующей с системами более высокого уровня, можно говорить не о равновесии, а об устойчивом состоянии, при котором такое состояние поддерживается диссипацией энергии и ростом энтропии в системах высшего уровня.

### **Самоорганизация и волновые процессы**

Самоорганизация неразрывно связана с волновыми процессами, т.е. процессами, самоподдерживающимися в нелинейной, диссипативной среде за счет распределенных в ней источников энергии. История их изучения восходит своими корнями к трудам математиков 30-40-х годов XX столетия (Р.Фишер, А.Н.Колмогоров, Н.Винер и др.). Особый вклад в это направление внесли И. Пригожин, Г. Хакен и Брюссельская школа физиков [6, 7, 19, 27]. Благодаря трудам этих ученых возникла наука синергетика (наука о самоорганизации открытых и далеких от термодинамического равновесия систем), была показана связь волновых процессов с процессами самоорганизации. После этих работ стало ясно, что практически в любых открытых, диссипативных и нелинейных системах неизбежно возникают автоколебательные процессы\*, поддерживаемые внешними источниками энергии, в результате которых протекает самоорганизация.

Для геологических систем самоорганизация и автоколебательные процессы представляют собой распространенное явление: гейзеры, флишевые толщи, формирование рудоносных структур [3], процессы метасоматоза [33] и др.

### **Вещество и энергия**

Одно из принципиальных положений, незримо присутствовавших в большинстве моделей прошлого века, молчаливо допускало, что вещество и энергия формирования эндогенных рудных тел имели единый источник. Для теорий “магматогенного рудообразования” рудные элементы и переносимые их флюиды поступали из магматического очага вместе с энергетическим ресурсом, необходимым для переноса и отложения рудного веще-

---

\* Автоколебания — незатухающие периодические движения, систематически возбуждаемые и поддерживаемые внешними неколебательными силами при отсутствии внешнего переменного воздействия.

ства. Теории, связывающие источники рудных элементов с вмещающими породами, предполагали поступление в области рудообразования горячих гидротермальных растворов, под влиянием которых происходила перегруппировка элементов и формирование рудных тел.

Во всех дискуссиях по этим вопросам основное внимание сосредоточивалось на веществе. Энергетические источники в то время вообще не привлекали внимания. Возможность их независимости от источников вещества не входила в круг обсуждаемых проблем. Лишь в последнее время эти идеи в самом разном виде все чаще и чаще появляются в геологической литературе. В связи с этим полезно обсудить возможные механизмы передачи энергии.

### **Механизмы передачи энергии**

В геологических науках подток энергии к области рудоотложения обычно рассматривается либо через теплопроводность, либо как конвективный перенос, осуществляемый перемещающимся расплавом или флюидом.

Хотя надежных количественных расчетов энергетических балансов процессов рудообразования, как и большинства других геологических процессов, пока еще не сделано, по существующим качественным моделям можно сказать, что такие механизмы могут обеспечить энергетическое обеспечение рудообразующих процессов далеко не во всех случаях.

Если формирование зон контактового метаморфизма с телами скарнов и скарноидов может быть связано с тепловой энергией контактирующих интрузивных тел, то для амагматогенных месторождений этот энергетический источник отсутствует.

Для месторождений, расположенных в непосредственной близости от магматических тел или даже в их пределах, по данным изотопной геохронологии, часто обнаруживается значительный возрастной разрыв между становлением интрузий и отложением рудного вещества. Так, для месторождений урана этот возрастной разрыв обычно составляет десятки и даже сотни миллионов лет. За это время происходит формирование целого ряда более высокотемпературных метасоматических и жильных минеральных новообразований, нередко внедряются различные дорудные и внутрирудные дайковые комплексы, происходит неоднократная смена тектонических деформаций [17]. По количественным оценкам скорость кристаллизации гранитных plutonov радиуса более 1 км составляет  $n \cdot 10^{-8}$  см/с, или несколько километров за 1 млн. лет [31]. Многочисленные замеры термобарических параметров флюидных включений в магматических и жильных минералах редкометальных месторождений и вмещающих их гранитов [16] показывают, что между областями существования расплава и формирования рудных жил на рТ диаграмме располагается обширная область, где образуются безрудные минеральные ассоциации (рис. 1). Время и тепловой баланс формирования этой "пустой" зоны (не менее 200°C), известной еще из схемы Эмонса, а теперь получившей количественные

термобарические ограничения, должны учитываться в генетических и энергетических построениях.

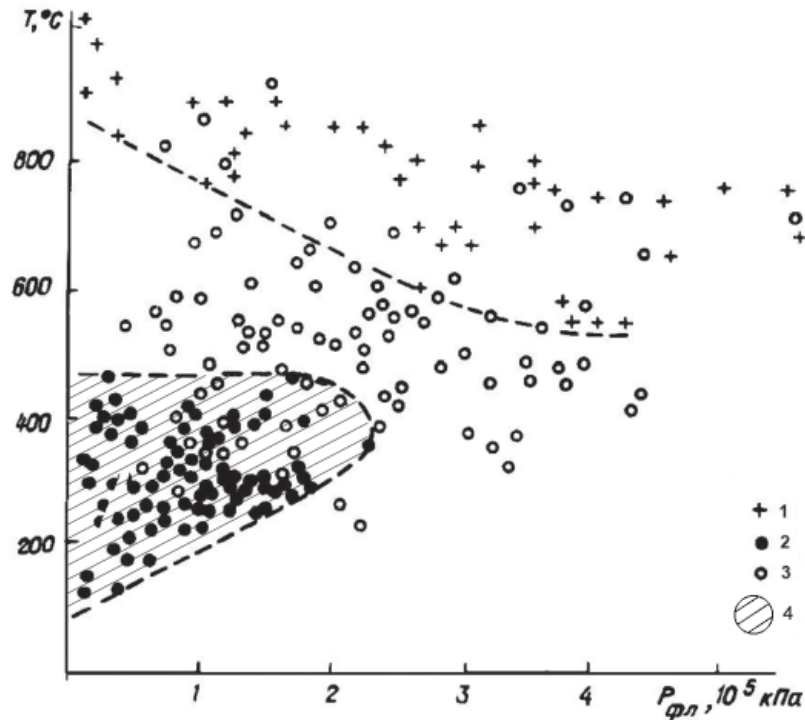


Рис. 1. рТ параметры, полученные на месторождениях олова, вольфрама и молибдена по включениям [16]:

1 – расплавленным, 2 – флюидным рудных стадий, 3 – флюидным дорудных жил, 4 – область рудоотложения

Что касается флюидного переноса энергии, то такой механизм осуществляется в природе, но на очень ограниченных расстояниях. Так работают гейзеры — самоорганизующиеся диссипативные системы.

Механизм их действия, основанный на взаимодействии поверхностных (холодных) и глубинных (перегретых) вод (рис. 2) можно разделить на 4 стадии. Холодные поверхностные воды, поступая в трещину, по которой движется перегретый пар, создают в канале водяную пробку — *стадия покоя*. Перегретая вода, накапливаясь под водяной пробкой, поднимаясь все выше и выше, начинает ее медленно вытеснять — *стадия излияния*. Когда мощность пробки сокращается, перегретая вода резко вскипает и выбрасывает остатки холодной воды вместе с пузырьками газа — *стадия фонтанирования*. И, наконец, начинается свободный выход вскипевшего пара — *стадия парения*, при которой исчерпывается весь запас накопившейся энергии перегретого пара. Периодичность функционирования каждого отдельного гейзера индивидуальна и зависит от гидродинамических характеристик холодной и перегретой воды, определяющих скорости их поступления в трещину. Такой динамический механизм периодического действия может функционировать многие годы, постоянно получая энергетическую подпитку из системы большего порядка — окружающей среды.

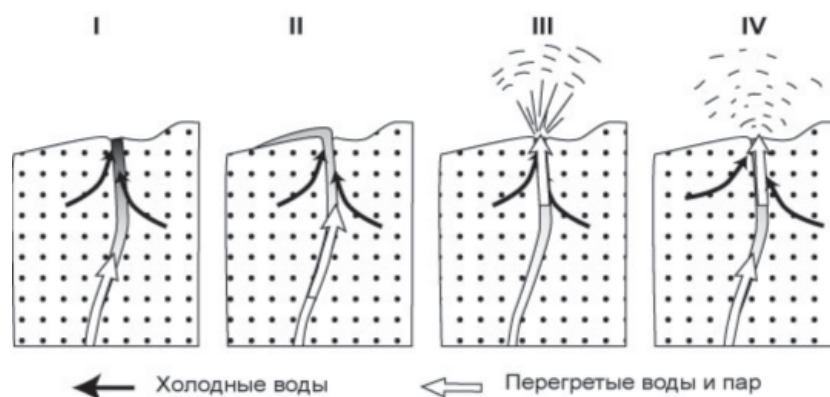


Рис. 2. Механизм действия гейзера

В физике рассматриваются и иные механизмы — механические, гидравлические, электрические, лучистые и т.д. Ни один из этих механизмов не может исключаться из рассмотрения при изучении природных процессов. Среди них особое место должны занимать механизмы волновой передачи энергии. Волновая передача энергии рассматривается в биологии, используется в технике, в том числе и бытовой (микроволновые печи), но не учитывается в геологии.

### Плюмы и зоны сейсмической прозрачности

В последнее время в геологической литературе активно обсуждается гипотеза “плюмов” — выявленных с помощью сейсмической томографии вертикальных структур пониженных скоростей сейсмических волн (от английского plume — перо, на которое по форме похожа эта область). Такое изменение характеризует уменьшение плотности вещества, объясняемое повышением температуры. Суть этой гипотезы состоит в том, что из глубин мантии происходит подъем разогретых струй (“плюмов”), как бы прожигающих литосферу [1] и выраженных на поверхности горячими точками (рис. 3). С проекциями плюмов на поверхность Земли предполагают пространственную связь месторождений различных полезных ископаемых, объединяющихся в металлогенические пояса, ареалы и нефтегазоносные бассейны [32]. Эти струи не участвуют в конвективном круговороте вещества мантии. Многие полагают, что они поднимаются с огромных глубин — с границы мантии и ядра или нижней и верхней мантий [25]. А между тем четкого определения понятий “горячие точки”, “плюмы” до сих пор нет, вернее всего потому, что пока это чисто модельная субстанция. Какая нужна энергия для “прожигания” коры и даже верхней мантии — остается большим вопросом. Ясно, что раз полученного запаса энергии, содержащегося в объеме “поднимающегося флюидно-магматического субстрата” для прожигания литосферы, а то и мантии, совершенно недостаточно. Нужна энергетическая подпитка. Она не может осуществляться за счет теплопроводности. Весьма проблематичны конвективные ячейки флюидного теплоносителя внутри самого плюма. Более вероятен волновой перенос энергии.

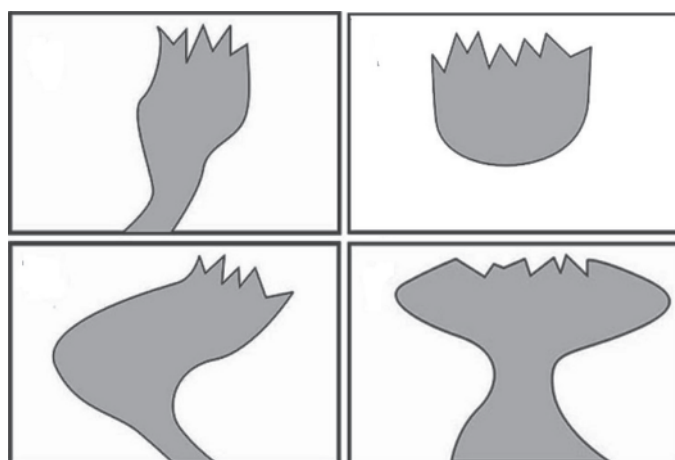


Рис. 3. Принципиальная схема "плюма" [1]

Кроме того, современные сейсмические данные фиксируют наличие в земной коре зон сейсмической прозрачности — “зоны отсутствия или существенного ослабления отражающих и преломляющих границ” [29]. В таких зонах сейсмические волны перемещаются с наименьшей потерей энергии. Их верхние части не доходят до поверхности (рис. 4), и верхние окончания могут играть роль волновых экранов, где будет происходить поглощение и трансформация (не обязательно тепловая) волновой энергии. Если изотропные физические среды прозрачны для сейсмических волн, то на границе разных физических сред происходит не только преломление, но и поглощение (точнее трансформация) части несущей ими энергии. На границе с гидросферой значительная часть сейсмической энергии трансформируется в механическую энергию разрушительной силы. Возникают электрические грозовые разряды и другие сопровождающие явления. Все это широко используется в технике, в том числе и бытовой (микроволновые печи, лазерные указатели и т.д.).



Рис. 4. Морфология зон сейсмической прозрачности [17]

Возможно, с волновой передачей энергии связаны некоторые “бескорневые” интрузивные тела, отсутствие батолитов, региональные процессы гранитизации и многие другие геологические явления. Все это требует са-



мостоятельного детального изучения с позиций механизмов волновой передачи энергии.

В современной сейсмологии основное внимание обычно обращается на момент, кинематику и морфологический тип механической деформации, а также на характер распространения деформационных волн с магнитудой больше 4. Другие следствия остаются как бы вне поля зрения. Но интерес геолога не ограничивается собственно механическими деформациями. Значительный интерес представляют химические, тепловые и другие виды преобразований минеральной среды. Как и в механике, в природных геологических системах при накоплении эффектов регулярной (устойчивой по параметрам) вибрации образуются направленные перемещения блоков горных пород разного масштаба, а также разнообразные явления минеральных преобразований (метаморфизма, метасоматоза) и упорядоченности геологических структур.

### Особенности рудообразования

Само размещение гидротермальных месторождений тесно связано с зонами тектонических нарушений. Анализ этих взаимоотношений с позиций тектонофаций [21] приведен на рис. 5.

В структуре зон дислокаций могут возникать своеобразные локальные и микроскопические “сейсмофокальные зоны”, где фокусируются волновые носители энергии. Их развитие происходит в импульсном режиме по сценарию сочетания периодов длительного накопления энергии и отно-

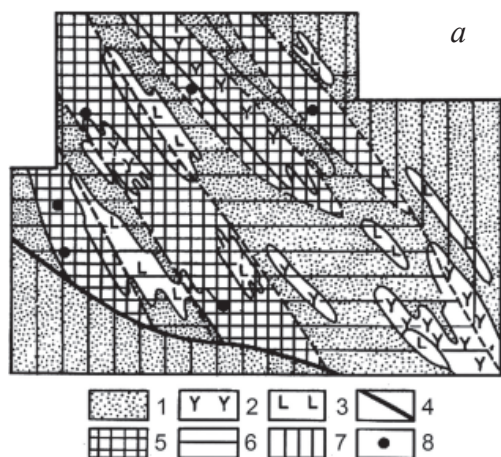


Рис. 5. Связь пространственного размещения рудных месторождений с тектоническими структурами [21]

*а* – район Шубниковского и Успенского месторождений, Алтай 1 – вулканогенно–осадочные породы, 2 – амфиболиты, 3 – диабазы, 4 – молодые разломы, 5–7 тектонофации: 5 – высокие, 6 – средние, 7 – низкие; 8 – месторождения. *б* – Джунгарский Алатау: 1 – сланцево-гнейсовый фундамент, 2 – карбонатный чехол, 3 – вулканогенные толщи, 4 – гранитоиды, 5 – зоны динамометаморфизма (а – высокие, б – низкие тектонофации) 6 – пересекающаяся шовная складчатость, 7 – шовная складчатость катазоны, 8 – главные разломы, 9 – месторождения (а) и рудопроявления (б)

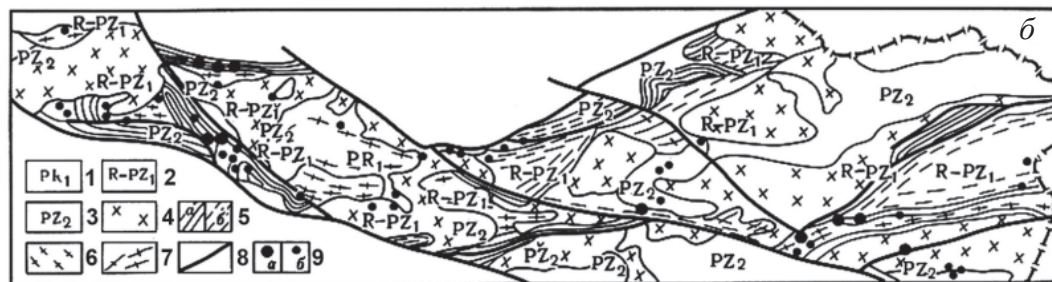
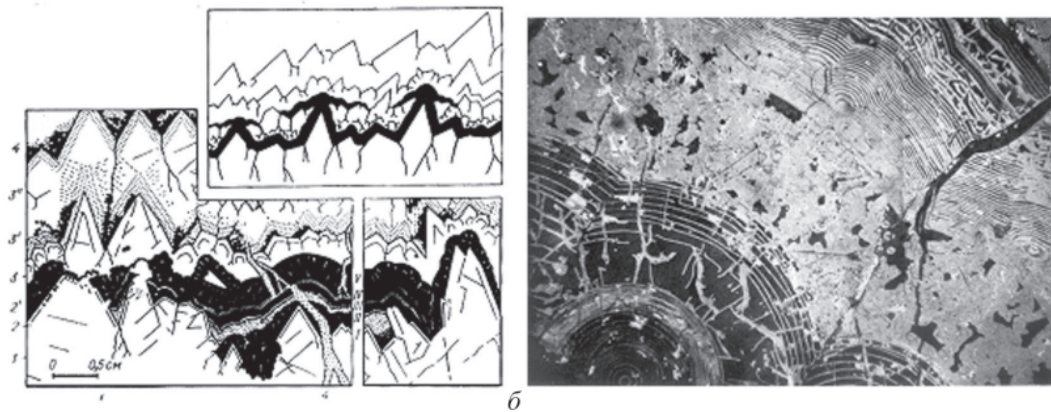
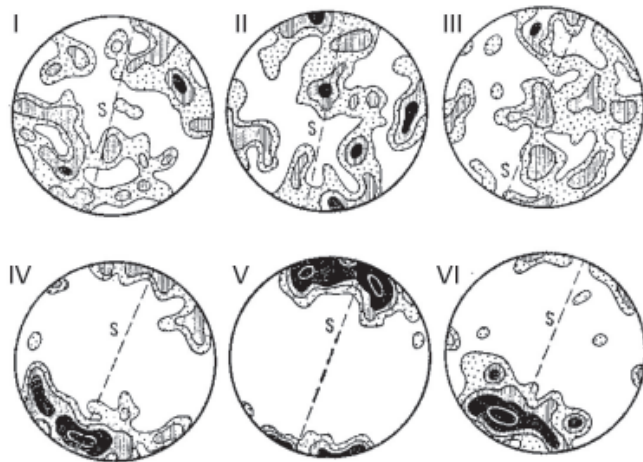


Рис. 6. *a* — Диаграммы ориентировки оптических осей кварцевых зерен в неизменных породах: I— аляскитовый гранит, II— гранодиорит, III— кварцевый микродиорит, и в бластомилонитах IV—VI. По [10]. *б* — Ритмическое отложение минералов в рудной жиле. По [8]. Слева — зарисовки жилы. 1, 3 — кальцит, 2 — настуран, 4 — кальцит с коффинитом, арсенидами и сульфидами. Справа — микрофото зоны корки настурана. Увеличение 200



сительно быстрой “разгрузки” в процессе множества сейсмических событий, разобщенных во времени, но концентрированных в пространстве. Такие сейсмофокальные зоны представляют собой также вибрационные геосистемы, определяющие внутреннее перераспределение энергетических ресурсов. В результате в зонах диафтореза происходит перекристаллизация породообразующих минералов, хорошо фиксируемая по оптической ориентировке породообразующих кварцев [10].

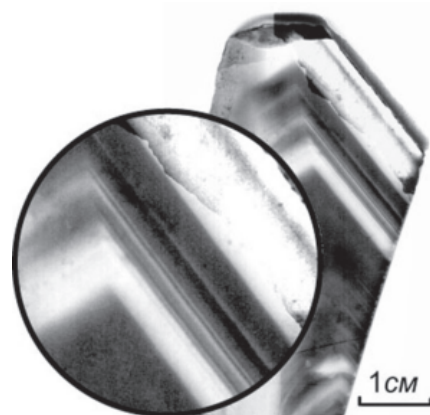


Рис. 7. Зональность кристалла горного хрусталя, выявленная после облучения рентгеновскими лучами.

Любой рудничный геолог хорошо знает, что в рудовмещающих структурах смещения со значительными амплитудами характерны для дорудных и пострудных периодов. Период рудообразования обычно характеризуется многочисленными малоамплитудными подвижками, фиксируемыми на разных уровнях и в разных масштабах. В пределах рудных тел всегда наблюдаются многочисленные жильные и прожилковые образования, дробление и пересечение, крустификационные жилы с макро- и микроритмами, зонально построенные минеральные выделения и даже отдельные кристаллы, фиксирующие микроритмы [8,14] (рис. 6).

Если прозрачный кристалл горного хрусталя облучить рентгеновскими лучами, то в нем выявляются микроскопические зоны роста, фиксирующие прерывистость минералообразования (рис. 7). Все это указывает на тектоническую напряженность данного участка в период рудообразования, разрешающуюся огромным количеством малоамплитудных вибраций, и явно требует существенных энергетических подпиток.

Изучение материала рудных жил и вмещающих пород позволяет обнаружить интенсивное микродробление, фиксируемое распределением цепочек первично-вторичных флюидных включений, трассирующих залеченные микротрещины (рис. 8). Эти включения могут иметь различные формы и размеры, разные коэффициенты заполнения, что связано с процессами зарастания микротрещин [13].

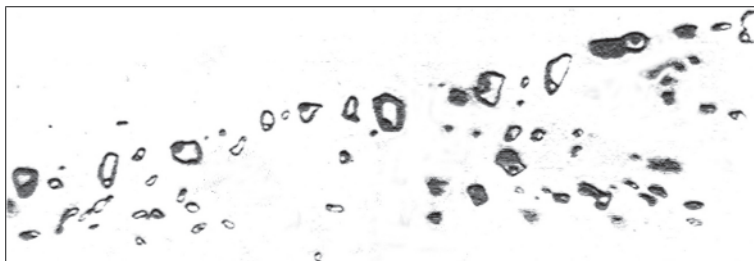


Рис. 8. Типичное расположение групп вторичных флюидных включений в породообразующем кварце. Увеличение 120

Сам факт приуроченности рудных месторождений к тектонически активным участкам обычно не вызывает каких-либо сомнений. Более того, он настолько привычен, что на нем даже не акцентируется особое внимание исследователей. А между тем это эмпирическое обобщение должно играть одну из ключевых ролей в моделях рудообразования, поскольку в нем отражены факты связи структурных и геохимических аспектов рассмотрения интересующих нас процессов [15]. Не одноактный детерминированный импульс, а период малоамплитудных, высокочастотных сейсмовибраций определяют специфику процессов концентрации руд. Видимо здесь же могут фокусироваться и вещественно-энергетические подходы к решению данной проблемы.

#### **Подток энергоресурсов**

Приведенные выше материалы позволяют вернуться к механизмам подтока энергетических ресурсов к локальным участкам рудообразования.

В природе имеется два способа переноса энергии в пространстве — посредством частиц или волн. При волновой передаче энергии частицы вещества в конечном счете не меняют своего пространственного положения, передавая энергетический импульс от одной частицы к другой. Энергия, переносимая волной, пропорциональна амплитуде и частоте их колебаний.

Такая энергетическая подпитка, действующая в течение всего периода рудообразования с меняющейся интенсивностью, периодически затухая и возобновляясь, может иметь сейсмическую природу [30]. Несмотря на незначительную энергоемкость отдельных импульсов, их интегральный эффект может быть весьма существенным. Если энергия фиксируемых землетрясений измеряется величинами порядка  $10^{15}$ – $10^{18}$  Дж, что превышает энергию взрыва стандартной атомной бомбы, а энергия форштоков и аферштоков на много порядков ниже, они порой фиксируются с частотой 5-40 мин на протяжении нескольких дней и более.

Высокочастотные колебания (рис. 9) часто оцениваются сейсмологами как “высокочастотный сейсмический шум”, хотя в последнее время к ним возник особый интерес как к информативному полю единого сейсмического процесса [11]. Энергетический эффект этих явлений пока надежно не оценен.

Явления сейсмической вибрации далеко не всегда заканчиваются сейсмическим событием (землетрясением). Суммарную энергию этих событий

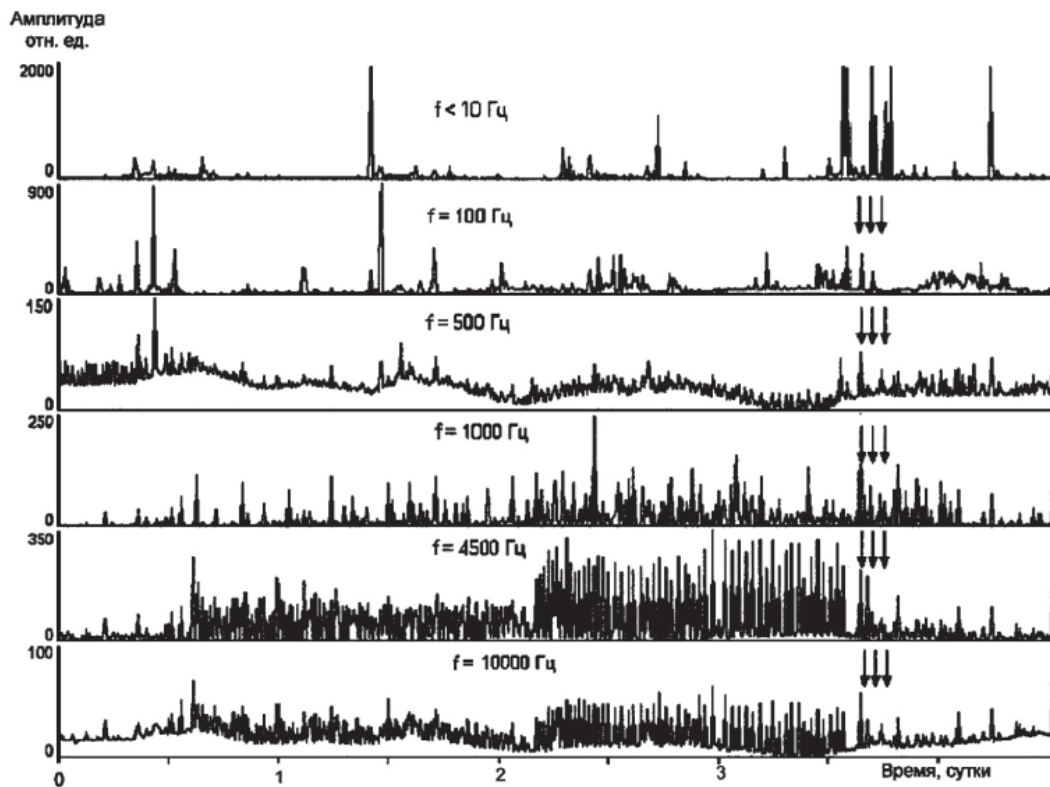


Рис. 9. Сейсмограмма предшественников землетрясений. Стрелками показан момент землетрясения

трудно оценить, однако именно вибрационные события, видимо, более характерны для процессов рудообразования, поскольку, как было отмечено выше, для периода формирования рудных тел характерны не крупные смещения, а многочисленные мелкие нарушения.

В условиях регулярной вибрации структурные преобразования имеют не шоковый, а последовательно эволюционный характер. В породных средах (особенно в слабвязких) наиболее общими следствиями природных колебательных движений с частотами в преимущественной “полосе” 6 -10 Гц являются эффекты вибромеханического перераспределения [18]. В этих условиях образуется регулярная параллельная полосатость, овоидные скорлуповатые структуры, квазислоистые концентрации тяжелых (в т.ч. рудных) зерен.

В структуре зон дислокаций могут возникать своеобразные локальные и микроскопические “сейсмофокальные зоны”, фокусирующие волновые носители энергии. Их развитие происходит в импульсном режиме по сценарию сочетания периодов длительного накопления энергии, поступающей из внешней системы, и относительно быстрой “разгрузки”. Все это происходит в процессе множества сейсмических событий, разобщенных во времени, но концентрированных в пространстве. Такие “сейсмофокальные зоны” представляют собой также вибрационные геосистемы, определяющие внутреннее перераспределение энергетических ресурсов.

В условиях вибрации ускоряются процессы диффузии и самоочистки (автолизии по А.Е. Ферсману) минеральных зерен; активно проявляются эффекты механического и механохимического взаимодействия частиц в минеральных средах. Реакционная активность локальных взаимодействий повышаются на порядки  $10^4$ - $10^8$ , даже по сравнению с аналогичными реакциями в жидкой фазе [9].

На рис. 10 показано изменение характера распределения микропримеси урана в породах зоны диафтореза, полученное методом  $f$ -радиографии [28].

В метаморфических сланцах уран равномерно рассеян в породообразующих минералах (а), в процессе гранитизации происходит очистка породообразующих минералов от посторонних примесей (б) и, наконец, в полнокристаллических разностях уран концентрируется в аксессуарных урановых и урансодержащих минералах (в).

В условиях высокочастотной вибрации высокая скорость процесса перераспределения химических элементов и минеральных зерен подтверждается экспериментами по воздействию ультразвука на дегидратацию и литификацию осадочных пород [2].

Суммируя все эти данные, можно прийти к выводу, что рудообразующая система является типичной диссипативной системой, которая развивается за счет внешних энергетических подпиток. В такой системе возникают внутренние автоколебательные процессы [4], приводящие к перераспределению вещества, зонально-аккреционному сепарированию и, в конечном счете, возникновению аномально высоких, по отношению к фону, концентраций отдельных компонентов.

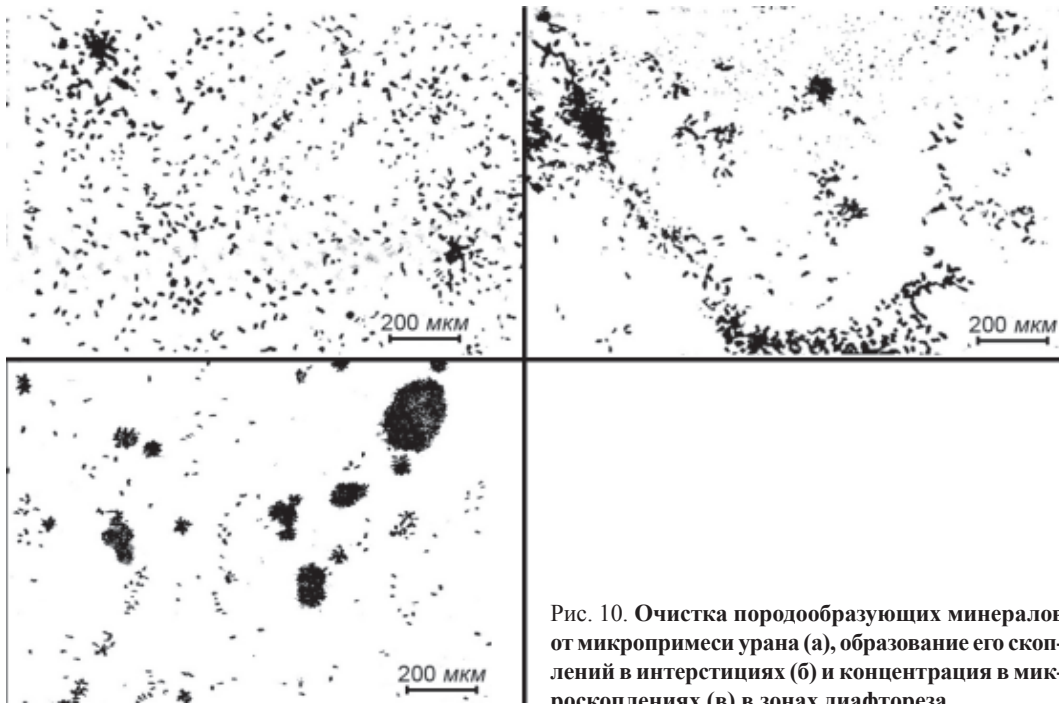


Рис. 10. Очистка породообразующих минералов от микропримеси урана (а), образование его скоплений в интерстициях (б) и концентрация в микроскоплениях (в) в зонах диафореза

### Перспективы дальнейшего изучения энергетики геологических процессов

Все рассмотренные закономерности относятся в равной степени как к континентальному, так и океаническому типу земной коры. Однако сложившиеся традиции изучения рудных месторождений на континенте концентрируют мысли в других направлениях. Наилучшие перспективы дальнейшего развития данного направления лежат в области объединения усилий морской геологии и сейсмологии [26,23].

Результаты изучения подводных землетрясений и движения морского дна и возникновения цунами, фиксация микросейсм [12] и анализ их интегральных воздействий с энергетических позиций могут дать новые эмпирические данные, позволяющие количественно оценить роль этого геологического фактора в трансформации распределения вещества геологических объектов.

### Выводы

1. Процессы рудообразования, ведущие к образованию локальных высоких концентраций отдельных компонентов, характеризуются не возрастанием, а убыванием энтропии, и, следовательно, не могут протекать самопроизвольно без дополнительного притока энергии извне. Такие системы являются типичными открытыми диссипативными системами.

2. Поступление дополнительных энергетических ресурсов, необходимых для развития таких систем, может осуществляться не только кондуктивным и конвективным путем, но и за счет волновой передачи энергии от внешних по отношению к данной системе осцилляторов.

3. Вещество и энергия, необходимые для формирования рудных тел, могут иметь разную природу, разные источники, пути и механизмы поступления в локальную область формирования рудных тел.

4. Наибольшие перспективы дальнейшего развития данного направления, в сложившихся традициях изучения рудообразующих процессов, лежат в области объединения усилий морской геологии и сейсмологии.

1. *Артюшков Е.В.* Быстрые погружения и поднятия земной коры на континентах с потерей прочности литосферного слоя как следствие подъема мантийных плюмов к подошве литосферы. // Вестник ОГГГН РАН, № 4(6) 1998. [http://www.scgis.ru/russian/cr1251/h\\_dgggms/4-98/artushkov.htm](http://www.scgis.ru/russian/cr1251/h_dgggms/4-98/artushkov.htm).

2. *Батулин С.Р. и др.* Химический состав и ураноносность поровых растворов в породах осадочного чехла. // Геохимия, 1984, №8, с 1174 — 1180.

3. *Богацкий В.В.* Механизм формирования структур рудных полей, Москва, “Недра”, 1986.

4. *Васильев В.А., Яхно В.Г.*, Автоволновые процессы, “Наука”, Москва, 1987, с.240

5. *Вернадский В.И.* Очерки геохимии. // Избранные сочинения, Т.1 М.: Изд-во АН СССР, 1954, с. 215.

6. *Вернадский В.И.* Пространство и время в живой и неживой природе. // Философские мысли натуралиста. М.: Наука, 1988, С. 223-224.

7. *Гленсдорф Л., Пригожин И.*, Термодинамическая теория структур, устойчивости и флуктуаций, “Мир”, Москва, 1973.

8. *Дымков Ю.М.* Природа урановой смоляной руды. М.: Атомиздат, 1973.

9. *Ениколопян Н.С.* Сверхбыстрые химические реакции в твердых телах. // ЖФХ. 1989. Т. 63, № 9. С. 2289-2298.

10. *Казанский В.И.* Рудоносные тектонические структуры активизированных областей. М.: Недра, 1972.

11. *Купцов А. В., Ю.В. Маранулец, Б.М. Шевцов.* Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке. //Электронный журнал “ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ” <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/262.pdf>.

12. *Левченко Д.Г.* Регистрация широкополосных сейсмических сигналов и возможных предвестников сильных землетрясений на морском дне М.: Научный мир 2005, 240 с

13. *Лемлейн Г.Г.* Морфология и генезис кристаллов. — М.: Наука, 1973, 327 с.

14. *Наумов Г.Б.* Миграция урана в гидротермальных растворах. // Геол. рудн. месторожд. 1998 т. 40 № 4 С. 307-325.

15. *Наумов Г.Б.* Структурно-геохимический подход к решению вопросов рудообразования. / Основные проблемы рудообразования и металлогении. М: Наука, 1990, С.167-183.

16. *Наумов Г.Б., Возняк Д.К., Наумов В.Б.и др.* Минералообразование и включения флюидов. // Минералогический журнал. 1984, № 3. С. 87-97.

17. *Наумов Г.Б., Соколова Н.Т., Матюшин Л.В.и др.* Роль контактового метаморфизма в формировании уранового оруденения // Геохимия. — 1986. — № 8. — С. 1113-1127.

18. *Нестеренко В.Ф., Чиков Б.М.* Механизмы перераспределения и концентрации элементов при импульсном нагружении. // Сдвиговый метаморфизм и рудоконтролирующие парагенезы. Новосибирск: Изд. ОИГГМ СО РАН, 1992, С. 36-37.

19. *Николис Г., Пригожин И.*, Самоорганизация в неравновесных системах, Москва, “Мир”, 1979.

20. *Овчинников Л.Н.* Источники рудного вещества эндогенных месторождений и надежность критериев их установления.// В сб. Источники рудного вещества эндогенных месторождений. М.: Наука, 1975, С.100-120.

21. Паталаха Е.И. Тектонофациальный анализ и метаморфогенное рудообразование складчатых областей // Процессы и закономерности метаморфогенного рудообразования. Киев, Наукова Думка, 1988. С. 44-56.
22. Пригожин И. Философия неустойчивости. Вопросы философии 1991, № 6. С. 46-57.
23. Соловьев С.Л. Достижения и проблемы морской сейсмологии, М., Наука, 1997. 334 с
24. Умов Н.А. Собрание сочинений. Т. 3. Речи и статьи общего содержания. М.: 1916.
25. Хаин В.Е. Современная геология: проблемы и перспективы. Соросовский образовательный журнал N 1, 1996, С.26-32.
26. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. Москва, Научный мир, 2001. 606 с.
27. Хакен Г., Синергетика. Москва, "Мир", 1980.
28. Цимбал Л.Ф. и др. К методике количественного анализа форм нахождения урана в горных породах. Геохимия 1986, № 4. С. 502 — 511.
29. Черкасов С.В. О возможности картирования трансформных палеосистем тепло-массопереноса с целью прогноза крупных рудных объектов. // Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. Т. 1 Глобальные закономерности размещения. М., ИГЕМ РАН, 2006, 390 с.
30. Чиков Б.М. Короткопериодные колебания в геологических процессах литосферы // Литосфера, 2005, № 2. С. 3-20.
31. Шарапов В.Н., Черепанов А.Н. Динамика дифференциации магм. Новосибирск: Наука, 1986.- 188 с.
32. Gatinsky Yu.G., Rundkvist D.V. Mesozoic — Cenozoic metallogenic provinces, Wilson cycle, and plume tectonics // Rus. J. of Earth Sciences. Vol.5, No1, Feb. 2003. <http://rjes.wdcb.ru/v05/tje02110/tje02110.htm>
33. Turing A.M., Proc.Roy.Soc.B., 1952., V.237. P.37.

Природні рудоутворювальні системи є типовими відкритими дисипативними системами. Енергія, необхідна для їх розвитку, може мати інші ніж для рудної речовини джерела, і передаватися шляхом хвильової передачі. Перспективи подальшого розвитку вказаного напрямку лежать в галузі об'єднання морської геології та сейсмології.

Natural ore-forming systems are typical open dissipative systems. The power the same for necessary for development of such systems can have sources not connected with ore substance and are carried out by its wave transferring. The prospects of the further development of present direction are in association of marine geology and seismology.