

Историческая геология

УДК 550.311

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ

Ф.А. Летников

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск
E-mail: letnikov@crust.irk.ru

Рассматриваются особенности геологического развития Земли с позиций синергетики. Отмечается, что Земля является нелинейной открытой самоорганизующейся системой, в процессе развития которой сформировались различные по составу оболочки. В кислородной сфере локально возникают, функционируют и со временем исчезают безкислородные скопления сульфидов, углеводородов и т. д. Дан анализ причин проявления дискретных процессов организации, накладывающихся на самоорганизующуюся систему Земли и связанных с проявлением внешних гравитационных сил триады Солнце – Земля – Луна. Характеризуются тектонические процессы в порядке уменьшения их энергетического потенциала. Отмечается, что эволюция геологических самоорганизующихся систем это процесс возникновения принципиально иных подсистем с новыми качествами, с совсем иными свойствами и параметрами существования, что значительно усложняет анализ их «родственных» связей. Рекомендуется применение для целей прогноза методов и подходов одной из областей синергетики – парадигмы динамического хаоса.

Ключевые слова:

Синергетика, самоорганизация, открытые системы, кооперация процессов, синергизм.

Key words:

Synergetics, self-organizing, open systems, cooperation of processes, synergy.

Синергетика – новое междисциплинарное научное направление по изучению открытых систем, обменивающихся с окружающей средой веществом, энергией и информацией. К ним в значительной мере относятся почти все геологические системы. Основатель этого научного направления немецкий физик Г. Хакен в 1986 г. кратко сформулировал суть этого нового научного направления: «Я рассматриваю синергетику как форум, на который собрались ученые разных специальностей, чтобы договориться, как справиться с большими системами». К ним относится большинство геологических систем, в которых с позиций синергетики рассматриваются совместное действие, кооперация процессов и явления самоорганизации.

С позиций синергетики планета Земля является нелинейной открытой динамической самоорганизующейся системой, в которой глобальные процессы самоорганизации необратимо развиваются вот уже в течение более 4 млрд лет [1]. Результатом такого самоорганизующегося процесса, который свершается главным образом за счет внутренней энергии планеты, является разделение ее на две различающиеся по составу оболочки: кислородная – мантия до глубины 2900 км, кон-

тинентальная и океаническая коры, гидросфера и атмосфера.

Следует заметить, что сугубо локально в кислородной сфере Земли возникают, функционируют и со временем исчезают безкислородные (вернее с минимальными содержаниями кислорода подсистемы) – скопления сульфидов, нефтей, углеводородных газов и т. д. Что касается горных пород, то они на 70...80 % по объему состоят из кислорода. Жидкое и твердое ядро Земли по геофизическим данным построено на базе безкислородных соединений железа, в котором растворено огромное количество водорода, углерода, серы и других газов. По аналогии с железными метеоритами вещество ядра должно содержать значительные количества никеля [2]. Поскольку плотность Fe даже при давлениях около 1 млн бар не превышает 8 г/см³, а плотность железного ядра более 9,2 г/см³ [2], то подобное «утяжеление» возможно происходит за счет накопления в металлическом жидком и твердом ядре металлов, стоящих в Периодической системе за Fe и имевших больший, чем у Fe удельный вес.

Если это предположение верно, то отсюда могут следовать важные металлогенические след-

ствия, ибо в этом случае земное ядро становится источником глубинных рудообразующих газовых систем в составе плюмов, которые могут переносить в верхние горизонты литосферы, в том числе и в земную кору, широкий спектр металлов — Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Y и TR, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Ta, W, Pt, Os, Ir, Au и др. Соответственно в твердой кислородной оболочке (мантия и кора) в ходе самоорганизующегося общепланетарного процесса преимущественно концентрировались элементы с большим сродством к кислороду, но в основном с плотностью ниже, чем у Fe, это Li, Be, Na, Mg, Ca, Al, Si, P, Ti, V, Th, U, Cr, Mn, K, B, C. Сюда же с определенной долей условности можно отнести и другие элементы с большим сродством к кислороду: Sr, Ba, Zr, Nb, Ta, Y и TR, Th и U. У последней группы элементов при их распределении по двум выделенным зонам Земли преобладающее концентрирование будет происходить при реализации двух конкурирующих тенденций: большое сродство к кислороду должно обусловить первичное преимущественное концентрирование их в кислородной матрице мантии, а значительная плотность — накопление в металлическом жидком ядре.

Эта модель в будущем требует более строгой термодинамической проверки с выходом на уравнения состояния при температуре T и давлении P , свойственных глубинным геосферам Земли. Такова в общем виде химическая модель Земли, которая возникла в ходе ее самоорганизации, когда каждая из выделенных сфер является носителем определенного энергетического потенциала.

Прежде чем перейти к анализу геологических процессов в верхних частях литосферы, доступных нашему наблюдению, необходимо подчеркнуть одну уникальную особенность геологического развития планеты Земля. С одной стороны она уже более 4 млрд лет формируется по законам самоорганизации, и этот процесс необратим со временем. С другой стороны, как это было показано Ю.Н. Авсюком [3], наличие у Земли такого «весомого» спутника как Луна периодически создает ситуацию, когда центр масс системы Солнце — Земля — Луна, расположенный в глубине Земли на расстоянии от центра Земли, равным 0,8 земного радиуса, испытывает перемещение, создавая в верхней части мантии и земной коре тектонические напряжения общепланетарного характера.

Иными словами, если рассматривать эту ситуацию с позиций синергетики, то мы сталкиваемся со случаем, когда на самоорганизующуюся гиперсистему, каковой является планета Земля, накладываются внешние гравитационные силы, порожденные взаимодействием триады Солнце — Земля — Луна. Уникальность такой ситуации очевидна, ибо если процессы самоорганизации реализуются за счет внутреннего энергетического потенциала самой Земли, то внешнее гравитационное воздействие совершается за счет энергетического источника, лежащего за пределами Земли. То есть, на

самоорганизующуюся систему накладываются дискретные процессы организации, ибо в отличие от явлений самоорганизации процессы организации реализуются только при приложении сил извне.

Таким образом, мы приходим к достаточно очевидному выводу: необратимый характер развития планеты Земля, включающий весь спектр геологических процессов, определяется ее внутренним энергетическим потенциалом, когда нелинейность диссипации энергии из недр (ядра) планеты подчеркивалась многими исследователями [1, 3, 4]. Если опираться на аргументацию Ю.Н. Авсюка [3], то причиной такой нелинейности диссипации внутренней энергии Земли как раз и являются внешние периодические воздействия. Поскольку именно эти два энергетических источника, внутренний и внешний, обуславливают весь спектр процессов тектонического характера, включая перемещение литосферных плит, террейнов, процессы метаморфизма, магматизма и т. д., то насущной задачей глобального геологического анализа является выявление вклада каждого из них в изучаемое явление. Трудность решения данной задачи осложняется еще и тем, что во всякой самоорганизующейся системе реализуются во времени два процесса: переход системы из одного стационарного состояния в другое, которое может занимать значительные временные интервалы (тем более в геологическом масштабе времени), и энергетические флуктуации внутри каждого стационарного состояния.

В иерархической соподчиненности геологических ансамблей, начиная от литосферных плит и заканчивая структурно-вещественными комплексами внутриплитного характера, на первое место выходит проблема оценки энергетической мощности каждого изучаемого природного явления. Именно такой подход позволил в первом приближении разложить все тектонические процессы в порядке уменьшения их энергетического потенциала. Среди них особое место занимают пассивные мегасистемы, характеризующиеся изначально различным энергетическим потенциалом. В этом случае граница раздела таких мегасистем будет характеризоваться особым напряженным тектоническим режимом. В качестве примера реализации такой ситуации можно рассматривать границу между океаническими и континентальными плитами, когда в определенной ситуации сейсмическая граница между ними, так называемые поверхности Беньофа, является следствием давления «тяжелой» океанической плиты на более «легкую» континентальную. Возникающие в таких обстановках напряжения могут передаваться в континентальной коре на значительные расстояния, на что в свое время обращал внимание Н.П. Кропоткин [5].

Убыль энергетического потенциала Земли более чем за 4 млрд лет ее геологической истории отразилась на мощности эндогенных геологических процессов, обусловленных энергетическим потенциалом астеносферных слоев и даже жидкого ядра. Хотя на этом фоне мощность воздействия

на литосферу пермо-триасового плюма убедительно показала, что земное ядро все еще обладает громадным энергетическим потенциалом. Предложенный нами механизм генерации тепла в ядре и на его границах с мантией [4] отчасти может объяснить механизм монотонной диссипации тепловой энергии из недр планеты, но проблема зарождения и продвижения плюмов к поверхности Земли еще требует своего решения.

Решающее значение при оценке мощности тектонических процессов играет способность того или иного субстрата к поглощению и трансформации подводимой энергии, что, в итоге, выражается в формировании стереотипных структурно-вещественных ансамблей, форма проявления которых на разных P - T уровнях литосферы и составляет суть тектонического анализа.

Применительно к сложным геологическим и другим природным системам главное достоинство синергетики заключается в том, что у таких систем в коротком временном интервале или за все время их существования возникают и проявляются новые свойства, подсистемы которых этими свойствами не обладали. И как справедливо подчеркивает Г.Г. Малинецкий [6], теория синергетики это, прежде всего, теория возникновения новых качеств у таких сложных систем.

Поскольку в большом количестве работ довольно произвольно используются термины «синергетика», «самоорганизация» и т. д., то применение специальной терминологии в рамках синергетики требует строго выдерживать значение используемых терминов. В противном случае, как это, к сожалению, имеет место, происходит вулгаризация синергетического подхода и дискредитация самой синергетики.

Открытая система обменивается с окружающей средой веществом, энергией и информацией.

Синергетика — совместное действие, кооперация процессов в открытых линейных и нелинейных неравновесных динамических системах.

Синергизм — содействие, сопряжение, кооперация объектов и процессов, сил и потоков вещества и энергии.

Самоорганизация — одна из форм синергизма, переход от хаоса в структурированное состояние за счет внутренней энергии системы (снижение энтропии).

Организация — снижение хаоса, уменьшение энтропии, структурирование за счет приложения внешних сил.

В ряде работ по синергетике говорится о равновесном состоянии систем, в которых проявляются синергетические эффекты. В системах, находящихся в термодинамическом равновесии, синергетические эффекты проявляться могут.

Более того, многообъемные сложные геологические системы, например, магматические камеры в земной коре или мантии, в ходе эволюции обычно распадаются на составные подсистемы, что хорошо выражается в фациальной разновидности магмати-

ческих фаз. И вот здесь выясняется, что у вновь возникающих подсистем проявляются совсем иные качества, которых вовсе не было в исходной сложной мегасистеме, что является отражением законов самоорганизации применительно к новым термодинамическим условиям, в которых оказалась первоначальная материнская система. Это могут быть снижение T и P , интенсивная диссипация тепловой энергии, как через теплопередачу во вмещающие породы, так и за счет такого универсального теплоносителя, каким является флюид.

Иными словами, для крупных магматических систем в условиях земной коры и верхней мантии необходимо выделять прогрессивную и регрессивную стадии развития. На прогрессивной в ходе воздействия на пассивную породную матрицу глубинного высокотемпературного флюида начинаются глобальные процессы ее плавления. Такой процесс протекает с поглощением тепловой энергии и переходом исходной породы в качественно новое состояние — магматический расплав, который в объеме магматической камеры представляет новообразованную систему со своими P - T параметрами, и самое главное — со своим запасом тепловой энергии, которая и является энергетической базой для проявления в массе расплава процессов самоорганизации.

Анализ природных мегасистем подобного рода указывает, что они характеризуются по вертикали и горизонтали сменой физико-химических параметров состояния систем, что обуславливает проявление процессов кристаллизации, которые и являются отражением динамики самоорганизации всего объема кристаллизующегося расплава в конкретной магматической камере. Более детально вопрос о кристаллизации гранитных магматических расплавов в земной коре в режиме смены управляющих параметров был рассмотрен нами ранее [1]. Еще более конкретно процесс автономизации вновь образованных подсистем проявляется при кристаллизации исходных изначально флюидизированных расплавов и отделения от них флюидов, которые отличаются от магматических расплавов по физическому состоянию, составу, набору флюидных, и, самое главное, рудных компонентов. На этом примере, очевидно, что эволюция геологических самоорганизующихся систем это по сути процесс возникновения принципиально иных подсистем с новыми качествами, которые настолько далеко уходят от исходной материнской мегасистемы с, совсем иными свойствами и параметрами существования, что установить их «родственную» связь иногда практически невозможно.

В науках о Земле, особенно в механике сплошных сред и горных науках, широко рассматриваются проблемы неустойчивости, которые напрямую примыкают к исследованиям теории катастроф. Если оперировать традиционными представлениями кибернетики и синергетики, то мы в геологических системах невольно входим в сферу определенных гносеологических противоречий, суть которых за-

ключается в главном: геологические системы, как правило, это долгоживущие системы, в которых стадия внешнего воздействия может длиться миллионы лет, и для них характерна отрицательная обратная связь. Суть этого термина заключается в том, что если в системе существует такая связь, то в ответ на внешнее воздействие система реагирует так, чтобы уменьшить это воздействие и сохранить состояние гомеостазиса, которое вовсе не адекватно понятию равновесие. Обратимся к примерам.

Толща осадочных пород испытывает воздействие высокой температуры и растущего давления. Стремление системы сохранить состояние гомеостазиса, т. е. сохранить структуру, текстуру и перемежаемость пород в толще осадочных пород, предотвратит их гомогенизацию за счет плавления, обуславливает в этой толще процессы метаморфизма, когда процессы образования новых минеральных ассоциаций идут с поглощением тепловой энергии (как противодействие росту температуры) и увеличению плотности вновь образованных минералов (как противодействие росту P). По сути дела все изохимические процессы метаморфизма горных пород это процессы с отрицательной обратной связью. Как правило, это линейные математические модели, для которых свойственна пропорциональность отклика системы на силу внешнего воздействия. Примеров таких множество, включая и многочисленные эксперименты с минералами и горными породами при высоких T и P , когда в подавляющем числе случаев в P - T координатах фазовые переходы с ростом T и P имеют линейный характер.

Другим наглядным примером отрицательной обратной связи является кристаллизация магматических масс в земной коре, когда весь процесс кристаллизации магмы можно рассматривать как процесс сохранения гомеостазиса исходного расплава [1]. Суть явления заключается в том, что магматический расплав, внедрившись в толще пород с температурой ниже, чем температура магмы, начинает отдавать тепло в окружающие породы через кондуктивный или флюидный перенос (возникает диссипативная структура). А поскольку изначальный запас тепла и флюидов со временем исчерпывается, то в магматической системе включается «резервный» механизм генерации тепла — полимеризация и кристаллизация исходного силикатного расплава.

Суть этого экзотермического процесса хорошо изучена различными инструментальными методами и заключается в том, что при достижении температуры, близкой к температуре ликвидуса, в расплаве начинаются процессы полимеризации силикатных ионов — «заготовок» будущих породообразующих минералов [7, 8]. На базе этих полимеров образуются будущие породообразующие минералы. Процесс этот идет с выделением тепла, о чем говорит «температурная полочка» кристаллизации, когда при объемной кристаллизации расплава его температура практически остается постоянной и резко снижается после завершения кристаллиза-

ции. В определенных условиях кристаллизации в эндоконтактной зоне количество выделившегося тепла будет столь велико, что оно скомпенсирует его диссипацию во вмещающие породы, и процесс кристаллизации на какое-то время может остановиться. Так в средне- и малоглубинных гранитных массивах возникают зоны фациальных неоднородностей гранитов, отвечающие границам остановок и продолжения затем кристаллизации исходного гранитного расплава.

В геологии при анализе процессов происхождения в глубинах Земли очень важное значение приобретает один из тезисов синергетики — о важности выбора начального состояния (в частности теорема КАМ — А.Н. Колмогорова, В.И. Арнольда, Ю. Мозера). Действительно, например, создание модели выплавления магмы в глубинах литосферы с последующим внедрением в земную кору во многом зависит от того, какое начальное состояние исходной матрицы мы выберем, при неверной оценке ошибки неизбежны.

При анализе очень сложных многокомпонентных геологических систем мы неизбежно сталкиваемся с оценкой степени их нелинейности хотя бы по набору управляющих параметров. При этом, как справедливо подчеркивает Клаус Майнцер [9], при анализе систем подобного рода «сложность означает не только нелинейность, но и наличие огромного числа элементов со многими степенями свободы» (стр. 29). И.К. Майнцер подчеркивает очень важный для геологов вывод о том, что «Поведение отдельных элементов в сложных системах с огромным числом степеней свободы нельзя ни предсказать, ни проследить вспять во времени. Детерминированное описание отдельных элементов должно быть заменено на эволюцию вероятностных распределений» [9].

К чести большого числа геологов, геохимиков и петрологов они уже давно интуитивно пользуются этим правилом. Действительно, чтобы познать особенности самоорганизации планеты Земля в возрастном диапазоне 4 млрд лет, в науках о Земле уже используется сравнительный метод сопоставления поведения отдельных элементов (или групп элементов) в сериях однотипных пород, сформировавшихся в различных геодинамических обстановках, что позволяет проследить именно эволюционный путь развития Земли как самоорганизующейся гиперструктуры [1].

В реальных геологических системах в условиях диссипации тепловой энергии в более холодные окружающие породы реализуется по терминологии К. Майнцера [9] диссипативная самоорганизация, многочисленные примеры применительно к геологическим объектам были рассмотрены мной ранее [1]. В качестве примера глобальной диссипативной самоорганизации рассмотрим процесс сопряженного одновременного формирования триады: гранитоидный слой — зона истощенной мантии — зона флюидизированной мантии (астеносфера) [10], рисунок.

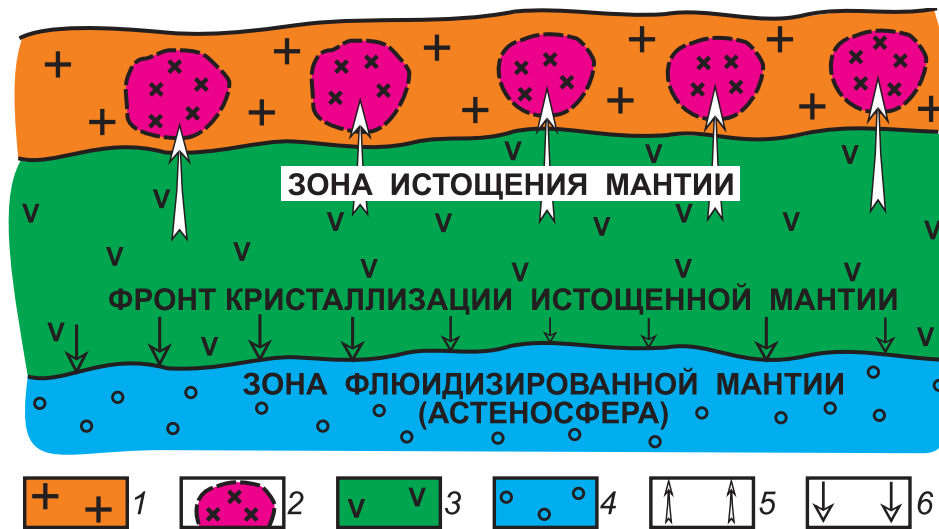


Рисунок. Модель формирования континентальной литосферы: 1) гранитогнейсовая кора; 2) гранитогнейсовые купола; 3) истощенная мантия; 4) флюидизированная мантия (астеносфера); 5) направление восходящих потоков флюидных и гранитизирующих компонентов; 6) направление нисходящих перед фронтом кристаллизации флюидных и сверхстехиометрических компонентов

Механизм этого процесса сопряженной самоорганизации начал реализовываться уже с архея. Суть его заключается в следующем. По мере падения энергетического потенциала Земли усиливается ее дегазация. Наиболее интенсивно этот процесс протекал в самой верхней части литосферы, где диссипация тепловой энергии была максимальной, что сопровождалось выносом из мантии флюидных и некогерентных по отношению к перидотитовой мантии Si, K, Na и отчасти Al. Так формировались гранитизирующие флюидные системы. На их основе протекал процесс формирования гранитогнейсового слоя литосферы, и, в частности, рост гранитогнейсовых куполов. Вынос из мантии флюидов гранитизирующих компонентов приводил к росту температуры солидуса остаточной базит-гипербазитовой матрицы и, как следствие, к ее кристаллизации и отступлению фронта кристаллизации на глубину. Перед таким фронтом кристаллизации происходило «отжатие» остаточных флюидных и некогерентных компонентов, что приводило к формированию зоны подстилающей флюидизированной мантии — астеносферы (рисунок). Эта схема многократно подтверждена геологическими и геофизическими данными: ибо, чем больше мощность гранитогнейсового слоя, тем больше мощность истощенной мантии и на большей глубине фиксируется верхняя граница подстилающей астеносферы [10].

Необходимо подчеркнуть и главное отличие геологических диссипативных самоорганизующихся систем от рассмотренных в синергетике. Судя по теории синергетики применительно к нелинейным диссипативным системам, в критических ситуациях старые структуры становятся неустойчивыми и разрушаются за счет изменения управляющих параметров. Но это не всегда так, обратимся к реальным ситуациям. Например, в ар-

хейских породах (Западная Австралия) наблюдаются потоки магмы ультраосновного состава, обогащенных сульфидами и благородными металлами, которые изливались на морское дно или внедрялись в осадочные породы и получили название коматиитов. Магма с температурой 1400...1600 °C, изливаясь в воду, попадает в катастрофически неравновесные условия — температура воды не выше 20...25 °C. Происходит очень быстрая кристаллизация магмы, с отсадкой тяжелых сульфидов к основанию лавового потока (при мощности лавового потока ~25 м толщина сульфидного пласта в его основании достигает 40 см), но, самое главное — разрушения лавового потока не происходит, он просто очень быстро кристаллизуется. Подобных геологических примеров можно привести множество.

В теоретических работах по синергетике и самоорганизации часто обсуждаются исходные или конечные состояния, обобщенные под названием «хаос». В реальных геологических системах состояние «хаоса» крайне ограничено, и, пожалуй, в определенной мере применение этого термина правомерно для следующих геологических ситуаций:

1) Самые ранние протодопланетные доархейские стадии формирования Земли как космического тела, когда планета начала образовываться из газопылевого сгустка материи. Самые ранние стадии формирования твердых пород и проторасплавов уже никак нельзя отнести к «хаосу», ибо горные породы обладают текстурой, структурой и образуют достаточно крупные массы. В значительной мере это относится и к магматическим расплавам, сложным преимущественно силикатными полимерами с высокой степенью самоорганизации таких систем в целом [7, 8]. И совсем термин «хаос» не может быть отнесен к стратифицированным осадкам и возникшим на их основе осадочным

породам, и в еще большей мере к метаморфическим и магматическим породам.

- 2) Термин «хаос» в геологических системах вполне обоснованно может быть отнесен к газовым смесям, это в первую очередь атмосфера, выбросы вулканов, газовые эксплозии, гидротермальные системы и в своей основе флюидные эндогенные и экзогенные системы. Хотя, следует заметить, в определенных динамических условиях скопления флюидов (особенно ниже критической температуры воды), уже нередко характеризуются расслоением в термо- или барогradientных условиях [1].

Любая нелинейная геологическая колебательная система характеризуется разделением по составу с формированием характерной зональности, которая может быть многоликой. Это могут быть зональные кристаллы пироксенов или плагиоклазов в магматических породах, рудных минералов в гидротермальных флюидных эндогенных системах. Во всех случаях это проявление нелинейности, точно так же как и в известной реакции Белоусова-Жаботинского.

С позиций синергетики все динамические открытые неравновесные геологические системы во времени являются ареной конкуренции управляющих параметров (мод). Обратимся к примерам. Рассмотрим магматические или метаморфические системы. При переборе всех управляющих параметров, играющих главную роль в эволюции геологических мегасистем, выделим три: температура — давление — флюиды. В режиме гомеостазиса в магматической камере ее стационарное состояние поддерживается соотношением именно этих трех параметров. Значительное изменение одной из мод обуславливает нарушение стационарного состояния системы и провоцирует ее изменение при сохранении изначального баланса масс породообразующих компонентов. Такой необратимый путь развития характеризуется прежде всего уменьшением числа степеней свободы и в конечном итоге при достижении какого-то критического значения или ее быстрой консервацией (кристаллизацию всей магматической массы) нередко сопровождаемой распадом системы — магматической

дифференциацией и отделением флюидов, в которых при определенных режимах концентрация примесных, зачастую и рудных компонентов, достигает значительных значений.

В математической физике и синергетике система называется детерминированной, если будущие события приемлемо определены прошлым. В геологии этот термин приобретает более расширенное значение. Так толща осадочных пород детерминирована совокупностью более ранних предшествующих формированию всей осадочной толщи процессов, где детерминизм является функцией многих переменных. Среди них на первое место выступают состав областей разрушения и сноса с континента в водный бассейн рыхлого материала и растворенных в воде химических соединений. Далее в качестве одной из мод выступает динамика образования осадка, его последующее преобразование в процессах диагенеза, катагенеза и метаморфизма.

В равной мере это относится и к магматическим процессам, где при прочих равных условиях минеральный (а иногда и химический) состав будущей магматической породы детерминирован составом исходной матрицы, и все последующие процессы дифференциации, динамики и рудоносности определены глубиной зарождения магматического очага, P - T условиями и флюидным режимом плавления.

В геологических науках значительное место занимает прогностическая область, где ученые занимаются прогнозом явлений ближнего, среднего и дальнего порядка. В еще большей мере это относится к климатологии, прогнозу погоды, землетрясений и других явлений, прогноз размещения и поисков месторождений полезных ископаемых и так далее. В этом плане для прогноза рационально углубленное применение методов и подходов одной из областей синергетики — парадигмы динамического хаоса, исходя из которого в последнее время широко применяются подходы из этой области знания, что позволяет в отдельных случаях оценить ограничения в области данного конкретного прогноза [9].

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 11-05-00628-а) и программы поддержки ведущих научных школ НШ-7422.2010.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. — Новосибирск: Наука, 1992. — 232 с.
2. Рингвуд А.Е. Состав и петрология мантии Земли. — М.: Недра, 1981. — 584 с.
3. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. — М.: ОИФЗ РАН, 1996. — 188 с.
4. Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблемы рудогенеза // Геология рудных месторождений. — 2001. — Т. 43. — № 4. — С. 291–307.
5. Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н., Макеев В.Н. Напряженное состояние земной коры и геодинамика // Геотектоника. — 1987. — № 1. — С. 3–24.
6. Малинецкий Г.Г. Синергетика. Кризис или развитие? Предисловие к книге К. Майнцера «Сложно-системное мышление». — М.: Книжный дом «Либроком», 2009. — 464 с.
7. Нарсеев В.А. Спонтанная полимеризация и ее роль в вулканическом процессе // Вулканизм и глубинное строение Земли. — М.: Наука, 1966. — С. 98–102.
8. Летников Ф.А. Некоторые вопросы термодинамики магматических процессов // Вулканизм и глубинное строение Земли. — М.: Наука, 1966. — С. 89–92.
9. Майнцер К. Сложно-системное мышление. — М.: Книжный дом «Либроком», 2009. — 464 с.
10. Летников Ф.А. К вопросу о природе глубинных гранитообразующих флюидных систем // Доклады РАН. — 2003. — Т. 391. — № 2. — С. 243–246.

Поступила 28.04.2011 г.