

УДК 551

О СООТНОШЕНИЯХ НАПРАВЛЕННОСТИ, ЦИКЛИЧНОСТИ И НЕЛИНЕЙНОСТИ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

А.А. Наймарк¹, В.С. Захаров¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Геологический факультет, Москва, 119991; e-mail: fnaim@ya.ru

Геология – наука историческая. Но линейная направленность и цикличность (периодичность) – неисторичны: это простейшее самовоспроизведение. В ходе такой геоэволюции не рождалось бы ничего нового; не было бы качественных скачков – перестроек, катастроф, непредсказуемого выбора расходящихся траекторий развития. Все предопределено на бесконечность в будущее, и обратимо к исходной точке, где только и мог быть сделан выбор. После этого все последующее прогнозируемо и реконструируемо – точно или статистически, без сильной зависимости от начальных условий и текущих флуктуаций. Признание как главных особенностей геоэволюции ее неустойчивости, поступательно-необратимого, самоподобно-дискретного, самоорганизованно-циклического, бифуркационного характера – с очевидной необходимостью подразумевает нелинейность – не как третьестепенную тенденцию, лишь «затушевывающую и осложняющую» линейную направленность и цикличность, а как глобальную закономерность, неотъемлемый атрибут развития Земли на всех этапах и масштабных уровнях.

Ключевые слова: геоэволюция, детерминированный хаос, нелинейность, необратимость, неравновесность, неустойчивость, цикличность.

Идет ветер к югу, и переходит к северу...
и возвращается ветер на круги свои. ... К тому месту откуда реки текут,
они возвращаются, чтобы опять течь. Что было, то и будет...
Екклезиаст (царь Соломон, 965- 928 гг. до н.э.)

Все в природе, без сомнения, подчинено закону
периодичности, правильной последовательности...
Э. Реклю (1830-1905)

...Правильная периодичность или повторяемость явлений в
пространстве или во времени есть основное свойство мира...
А.Л. Чижевский (1897-1964)

Символом нашего физического мира не может быть устойчивое
и периодическое движение... Это мир неустойчивостей и флуктуаций...
Г. Николис, И. Пригожин (1917-2003)

ВВЕДЕНИЕ

В последние 20–25 лет основы естественных наук качественно обновляются под влиянием теорий бифуркаций, катастроф, фракталов, термодинамики открытых сильно неравновесных систем, самоорганизации. Эти идеи, ныне объ-

единенные понятием «нелинейной динамики» и в корне изменившие представления о соотношениях регулярности и случайности, упорядоченности и хаотичности, предсказуемости и непредсказуемости, быстро вторглись в науки о Земле.

Отношение к этому неоднозначно – от признания нелинейности как фактора, лишь

осложняющего давно известные направленность и цикличность природных процессов, до утверждений о том, что нелинейная динамика, выявляя новый, более высокий уровень единства природы, начинает определять «мировоззрение и стратегию развития человечества» (Новое в синергетике..., 1996, с. 166). По-разному толкуются основные понятия и связанные с этим дискуссионные вопросы. Некоторые из них рассматриваются в предлагаемой статье.

НАПРАВЛЕННОСТЬ, ПОВТОРЯЕМОСТЬ, РАЗНОМАСШТАБНОСТЬ, НЕРАВНОМЕРНОСТЬ: СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Еще на ранних этапах освоения природы были подмечены в ее пространственной и временной изменчивости признаки неслучайности, повторяемости. Ныне известно, что повторяемость на фоне общей направленности эволюции сопровождается проявлениями разномасштабности и неравномерности. За этим обычно видят взаимное наложение и суммирование неких относительно простых фундаментальных закономерностей, обусловленных как региональными или планетарными процессами развития Земли, так и внешними воздействиями ближнего и даже дальнего Космоса. Полагают, что их познание должно открыть путь к научно обоснованным реконструкциям прошлых и прогнозам будущих событий и обстановок.

Подобные взгляды требуют четкого понимания и определения того, *что* именно наблюдается. В чем состоят и как взаимосвязаны отмеченные тенденции развития?

Обобщающих высказываний по обсуждаемой проблеме немало. «...Основным свойством структурообразующих процессов является нелинейность. ...Не следует переоценивать представления о строгой периодичности, цикличности и синхронности тектонических эпох и фаз» (Пушаровский и др., 1999, с. 6). По (Anderson, 2002), наша планета представляет собой нелинейную неравновесную самоорганизующуюся диссипативную открытую систему. «Эта формулировка в духе идей И. Пригожина представляется мне исключительно удачно отражающей суть вещей» (Хаин, 2003, с. 826). Эволюцию Земли и земной коры определяли направленность, необратимость в целом и многопорядковая цикличность, при этом «...цикличность есть лишь осложнение... общей направленности. Направленность эта определяется постепенной, но неуклонной диссипацией энергии...» (Лобковский и др., 2004, с. 379). Возможен резонанс между «...силами глобальной геодинамики и некими космическими... силами, что могло

приводить к нестационарным быстрым глобальным явлениям. ...Внешнее воздействие может резко вывести систему из равновесия и привести к экстремальным процессам» (Лобковский и др., 2004, с. 560).

В работе (Хаин, Халилов, 2009) исследованы соотношения направленности и цикличности геэволюции, которая «...в целом определяется алгебраическим суммированием двух главных составляющих. Первый, монотонный компонент отражает направленно-поступательную эволюцию Земли... Второй компонент является периодическим...» (Хаин, Халилов, 2009, с. 95). «...Наложение цикличностей разных масштабов может вызывать появление совершенно новых цикличностей... Накладываемые цикличности бывают весьма далеки от идеальных синусоид...» (Хаин, Халилов, 2009, с. 432, 433). Направленность и цикличность, «...могли бы быть изображены в виде прямой линии – “стрелы времени”... и синусоиды». Проявления нелинейности в цитируемой работе специально не рассматривались, тем не менее, сделан вывод: «...нелинейность лишь осложняет и затушевывает эти закономерности, но отнюдь их не отменяет и не подменяет» (Хаин, Халилов, 2009, с. 98-99).

Анализ обширного фактического материала не привел в цитируемых работах к однозначному взгляду на нелинейность. Упомянутая ранее *первой* в ряду других главных характеристик (Пушаровский и др., 1999; Хаин, 2003; Anderson, 2002), она представлена позже как всего лишь третьестепенная в иерархии закономерностей эволюции Земли, осложняющая и затушевывающая общую направленность и цикличность (Хаин, Халилов, 2009). Это – радикальная переоценка роли нелинейности и ее следствий не только в науке, но и в практике. Правомерна ли она?

Для получения общего ответа нет необходимости анализировать конкретные примеры каких-либо результатов геологических наблюдений, согласующихся или не согласующихся с такой переоценкой. Достаточно показать, что она прямо противоречит неоднократным, подтвержденным опытом, признаниям того, что, Земля – открытая, неравновесная, диссипативная, самоорганизующаяся, поступательно-необратимо развивающаяся система. В такой системе даже при равномерном поступлении энергии могут возникать сложные непериодические автоколебания; резонанс внешних и внутренних процессов (в случае вынужденных колебаний) может породить нестационарные быстрые глобальные явления, а взаимное наложение разномасштабных цикличностей – приводить к повторяемости с совершенно новыми параметрами. Все эти свойства реальны только и именно

при условии фундаментальной нелинейности системы Земля. Но тогда оказываются под сомнением «строгая периодичность», «синусоидальность», «алгебраическая суммируемость», которые наблюдались бы в случае линейной ее эволюции. Именно соотношения вышеупомянутых тенденций, а не их конкретные геологические проявления, давно и неоднократно описанные в литературе, анализируются в данной статье.

Сказанное требует анализа — в приложении к рассматриваемой проблеме — некоторых основных положений нелинейной геодинамики. Без этого опытные факты и обобщения воспринимаются, как видим, неоднозначно и приводят к противоречивым суждениям.

Отметим, что зачастую это связано с недостаточно корректным использованием подходов и понятий синергетики и нелинейной науки, иногда сводящимся к применению «модных» терминов. Одна из задач нашей работы — дать по возможности простой, но строгий анализ проблем нелинейности для геологов.

Особенно важно изложение предлагаемого подхода для молодого поколения специалистов в области наук о Земле, поскольку, как представляется авторам, именно на этих путях возможно углубление понимания современных проблем геологии.

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЗЕМЛЯ

Прежде всего, подчеркнем: система — это вовсе не тот или иной реальный объект; это модель объекта, создаваемая исследователем для решения определенной задачи. Любая теория «... всегда исследует объекты, определенным образом препарированные мышлением. Все естественные науки работают с моделями объектов реальности. ...Мы фактически имеем дело не с объектами — фрагментами литосферы, а лишь с их аналитическими, графическими или мысленными моделями — геологическими или специализированными картами, схемами, таблицами, словесными описаниями...» (Методы..., 1978, с. 26).

Любые результаты исследования непременно дискуссионны именно потому, что они — не сама реальность, а ее модельное отражение. Система как модель — это «...не вещь, а перечень переменных»; абстракция удобная для анализа, «совокупность элементов любой природы и их связей, выступающая в заданном отношении как целое» (Методы..., 1978, с. 29, 30). Конкретной системе противопоставляют ее окружение, *среду* — тоже систему: комплекс условий, влияющих на поведение данной системы. Поведение же — упорядоченное во времени множество состояний, отражающее изменения (динамику) объекта. Задача предсказания поведения объекта на

основе данных о его начальном состоянии сводится к нахождению некоторого закона, описывающего изменения.

Соответственно, динамическая система — это математическая модель объекта, для которого, по В.С. Анищенко (2002), однозначно определено понятие состояния как совокупности некоторых величин (переменных состояния, или координат фазового пространства) в данный момент времени, а также задан посредством дифференциальных уравнений, дискретных отображений и пр. *закон* изменения (эволюции), который должен позволить прогнозировать будущие и реконструировать прошлые состояния. Состояние системы однозначно определяется числом степеней свободы (минимально необходимым числом независимых координат), а изменение состояния показывается траекторией точки в фазовом пространстве. Для однозначного решения соответствующих уравнений нужно, помимо переменных, характеризующих положение, задать начальные значения скоростей. Система с n степенями свободы характеризуется фазовым пространством размерности $N = 2n$.

Наряду с законами статистическими, учитывающими флуктуации в исходных динамических уравнениях и сводящими эволюцию к некоей вероятностной, средней траектории, выделяют также законы детерминированные, или динамические, фиксирующие однозначную связь причины и следствия. В этом случае задание некоторого начального состояния подразумевает существование единственного решения, однозначно указывающего будущие или прошлые состояния в любой момент времени. Закон может представлять собой функцию, дифференциальное или интегральное уравнение, правило, заданное таблицей или графиком и т. д.

ОТКРЫТОСТЬ, НЕРАВНОВЕСНОСТЬ, НЕУСТОЙЧИВОСТЬ, НЕЛИНЕЙНОСТЬ

В отличие от идеализаций классической термодинамики — «замкнутых», «закрытых» систем, эволюционирующих к однородности и равновесию, — в реальных объектах, представляемых «открытыми» системами, непрерывно идет приток извне или сток вовне вещества и энергии. Рассеяние (диссипация) энергии и рост энтропии (разупорядоченности) могут неустойчиво уравновешиваться противоположными процессами так, что термодинамические силы (градиенты плотности, температуры и др.) и потоки (массы, энергии и др.) близки к нулю. Но неустрашимая полностью конкуренция двух указанных тенденций чаще порождает слабую неравновесность, когда потоки ненулевые и зависят от градиентов линейно.

Что понимается под линейностью? В математике — это сводимость заданной зависимости к пропорциональности, выражаемой уравнениями определенного вида, числовыми последовательностями (прогрессиями), графическими изображениями (в принятой системе координат, в определенном масштабе, с приемлемой погрешностью) прямой линией или семейством прямых, отвечающих решениям линейных уравнений. «Пользуясь геометрическими образами, можно сказать, что решение линейной задачи в некотором смысле подобно прямой линии — по любому ее отрезку без труда восстанавливается вся линия» (Компьютеры..., 1988, с. 38). Любые иные зависимости рассматриваются как нелинейные. Понятия линейности и нелинейности приложимы к уравнению, к функции, к производным. Уравнение может быть линейно, искомая функция — нелинейна; функция может быть нелинейна, ее производная — линейна.

В идеальной строго линейной консервативной (бездиссипативной) системе составляющие разнофакторного процесса воздействия не влияют друг на друга; результат представляет сумму (суперпозицию) эффектов, вызываемых воздействием каждого фактора в отдельности. Эволюция такой системы неоднаправленна: она обратима, но, конечно, лишь мысленно, при формальном обращении времени в инвариантных к этому фундаментальных уравнениях классической механики, не содержащих различия между прошлым и будущим. Реконструкции прошлого не требуют знаний о промежуточных событиях, а для прогноза будущего несущественны небольшие неточности в задании начального состояния или параметров системы: получающиеся ошибки пропорциональны им (система устойчива по начальным условиям и параметрам). Малые же случайные возмущения в условиях слабой неравновесности быстро затухают. К синусоидальности близка — в отсутствие трения — цикличность именно таких, слабо неравновесных консервативных систем. При наличии трения пропорционального скорости, т.е. линейного изменения координаты, колебания затухают; незатухающие же невозможны, так как расходуемая энергия не пополняется.

В реальных процессах линейность — всегда не только приблизительная, но и временная. В силу открытости систем их неустойчиво-равновесное или слабо-неравновесное состояние раньше или позже по мере роста энергии сменяется неравновесием. Оно, в свою очередь, по чисто физическим причинам должно смениться приближением к равновесию, устойчивым тоже лишь временно: раньше или позже нарушится и эта тенденция, энергия вновь будет расти... Так возникает цикличность со

слабо или сильно меняющейся собственной частотой.

В условиях сильной неравновесности термодинамические потоки зависят от сил нелинейно: отклик системы (сигнал на выходе) непропорционален внешнему воздействию (сигналу на входе), свойства системы непосредственно зависят от ее состояния. Общим является именно нелинейный характер законов природы; линейные же законы, сколь бы многочисленны ни были примеры их проявления — частный случай или приближение нелинейных. Именно и особенно нелинейным системам свойственна смена режимов функционирования в зависимости от начального состояния, управляющих параметров и внешних воздействий (Анищенко, 2002), а цикличность (возможная и в условиях слабой неравновесности) проявлена мощно и разнообразно: характерны — при постепенном изменении управляющего параметра — неоднократные скачкообразные переходы (бифуркации) к одному из двух или нескольких (многих) равновозможных ветвей дальнейшего развития. Так, функция, однозначно задающая (в нелинейном уравнении переноса) начальную амплитуду волны некоторого возмущения, может в один из последующих моментов оказаться неоднозначной, если скорость распространения нарастает в вершине волны быстрее, чем в основании, что приводит фронт ее профиля от наклонного к вертикальному положению, а затем и к S-образному искривлению. Математически это означает наличие на некотором временном интервале трех теоретически *равноправных* решений, из которых в реальности избирается какое-то одно.

Многоранговость же реальных структур обусловливает неоднократность подобного непредсказуемого выбора. Он при достижении одним из параметров некоторого критического значения (точки бифуркации), т. е. в состоянии максимальной неустойчивости системы, реализуется действием какой-то одной из множества флуктуаций. Новый, устойчивый режим может быть в чем-то похож на предыдущий или отличен от него, начальные же условия забываются.

Таким образом, именно открытость систем создает предпосылки неравновесности, и именно «...неравновесность выявляет потенциальные возможности, содержащиеся в нелинейностях и как бы “дремлющие” в равновесии или вблизи него» (Николис, Пригожин, 1990, с. 74). Порождаемые неравновесностью и нелинейностями неустойчивости объясняют чрезвычайную чувствительность эволюции к малейшим изменениям начальных условий и параметров и вытекающую из этого ненадежность прогнозирования будущего состояния.

Реконструировать же прошлое можно было

бы, лишь точно зная характер, длительность и последовательность отдельных стадий процесса, ибо в нелинейном развитии принцип суперпозиции (суммативности) не выполняется.

Характер нелинейности, вид зависимости параметров от переменных состояния, удаленность от положения равновесия определяют свойства и поведение системы. Так, с усилением внешнего воздействия и увеличением амплитуды вынужденных колебаний, по мере сближения периодов их и основных колебаний системы, происходят последовательные удвоения периода, спектр частот вынужденных колебаний становится сплошным, зависимость координаты от времени становится хаотической, а поведение системы — практически непредсказуемым. Большинство систем под действием внешних возмущений и внутренних флуктуаций постоянно отклоняются от некоторого стандартного состояния. Открытые диссипативные системы в зависимости от значений потока энтропии в ходе обмена с внешней средой могут не только приближаться к разупорядоченности, однородности, устойчивости, но и удаляться от них — с сопутствующим самоструктурированием, ростом упорядоченности, организованности.

Направленная эволюция динамической системы характеризуется стремлением к аттрактору — области в фазовом пространстве, к которой самопроизвольно «притягиваются» траектории после затухания переходных процессов. Для линейных диссипативных систем с одной степенью свободы в двумерном фазовом пространстве (плоскость координата — скорость) возможно лишь равновесие, представляемое тривиальным аттрактором — неподвижной точкой. Для нелинейных диссипативных систем в этом случае возможен также и иной тип устойчивой динамики — периодические автоколебания, которым в фазовом пространстве соответствует новый тип аттрактора — предельный цикл, при этом доли рассеиваемой и вносимой энергии строго компенсируются (Анищенко, 2002).

В трехмерном (и большей размерности) фазовом пространстве возможны, кроме точки и предельного цикла, также: а) траектория некоторого сложного, но периодического (или квазипериодического) процесса со случайным выбором правого или левого спирального навивания высокочастотной траектории на низкочастотную по поверхности тора («бублика»); б) незамкнутая, нигде не самопересекающаяся, строго детерминированная начальными условиями и — при их точном задании — однозначно воспроизводимая траектория сложного аperiodического движения в пределах замкнутой области — странного аттрактора самоподобной (фрактальной) структуры с нерегулярными, но

не чисто случайными колебаниями с множеством бифуркаций, где направление предстоящего витка избирается в режиме детерминированного хаоса.

САМООРГАНИЗАЦИЯ, ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС, ПРОГНОЗ

В открытых системах отток энтропии в окружающую среду может превосходить ее возращание, сопутствующее диссипации энергии. Это приводит к спонтанному структурированию (самоорганизации). Классический пример — переход от теплопроводности к конвекции, которая неоднократно перестраивается, и далее — к турбулентности, тоже скачкообразно усложняющейся при плавном росте градиента температуры. Так, даже при равномерном изменении внешнего воздействия система самопереструктурируется.

Существование, но и противоборство упорядочения и случайности на всех уровнях системы порождают динамический хаос — режим принципиально иной, чем стохастичность, например, теплового движения молекул жидкости или газа. В отличие от совершенно неупорядоченных, полностью случайных колебаний («белый шум»), эволюция определяется параметрами системы, начальными координатами и скоростью *теоретически* однозначно. Но *реально* малейшая неточность в начальных условиях или параметрах вследствие нелинейности быстро возрастает, и неопределенность траектории достигает порядка размеров области движения.

Традиционное противопоставление детерминизма и хаотичности было камнем преткновения в осмыслении непредсказуемого движения, в котором вполне предопределяемая начальными условиями траектория оказывалась беспорядочно запутанной. Объяснение было найдено не в чрезмерно большом числе степеней свободы, не в осложнении множественными флуктуациями, а в экспоненциальном разбегании из близких исходных состояний вследствие бифуркационности из-за невозможности как бесконечного отклонения от исходного равновесия, так и бесконечного пребывания в нем траекторий необычайно чувствительных к малейшим неточностям начальных условий и возмущениям текущего состояния. В ходе такой эволюции система может непредсказуемо посещать и покидать ряд состояний-аттракторов, всякий раз преодолевая точки бифуркации и попадая после этого в область притяжения другого аттрактора. Необходимость статистического подхода к описанию подобного вполне детерминированного процесса обусловлена не незнанием закона движения или несовершенством методов изучения, а свойствами самого движения, порождаемого характером связей.

Вероятностное описание для хаотических систем несводимо к отдельной, средней траектории и необратимо: прошлое и будущее играют различные роли. «Хаос приводит к включению стрелы времени в фундаментальное динамическое описание» (Пригожин, Стенгерс, 1994, с. 9). Только исследование нелинейных динамических систем выявляет «...объединяющий элемент в неисчерпаемом разнообразии ситуаций, наблюдаемых в природе...» (Пригожин, Стенгерс, 1994, с. 257). Предсказать будущее состояние однозначно можно только при строгом задании начальных условий. «Однако, если учесть сколь угодно малую, но конечную ошибку..., то детерминированное предсказание становится невозможным... Хаос был обнаружен практически во всех областях современного естествознания...» (Анищенко, 2002, с. 47, 48). Ранее с ним «...однозначно связывали представления о случайном процессе. Теперь мы знаем, что подобными свойствами может обладать процесс, порождаемый детерминированными законами» (Анищенко, 2002, с. 49-50). В приложении к тектонодинамике это было показано, например, в (Наймарк, 2003).

Именно хаотичность в концепции нелинейности привлекает особое внимание исследователей в самых разных областях знаний – по нескольким причинам. Во-первых, различить временные ряды хаотического и многочастотного циклического движения (часто, но далеко не всегда корректно «опознаваемого» по результатам натурных наблюдений) очень не просто. Во-вторых, оказалось, что «хаос ожидает нас на каждом шагу в самых простых системах» (Новое в синергетике..., 1996, с. 124). В-третьих, выявились принципиально различные типы хаотического движения, представленные, например, случайным броуновским движением и обнаруженной не только в жидкостях и газах, но и в твердых телах турбулентностью (Т), сочетающей случайность и высокую организованность. В-четвертых, особенности Т-хаотичности требуют нового подхода к рассмотрению проблемы прогнозируемости очень многих, по существу, любых природных явлений.

Что же такое хаотичность? Если временной ряд сходится к вполне определенному значению и остается далее постоянным во времени – это состояние равновесия (одноточечный аттрактор); если обнаруживается периодичность – это предельный цикл. Если множество независимых факторов случайным образом влияют на процесс (тепловое движение молекул газа, жидкости, диффузия и др.) – это классическая стохастичность, когда каждое следующее состояние не зависит от предыдущего, оно полностью случайно и непрогнозируемо, «память» отсутствует, возможно только статистическое описа-

ние, а вероятности состояния выражают степень нашего незнания всех деталей процесса.

Детерминировано-хаотические системы диссипативны (тратят энергию), но и «открыты» (получают энергию извне). Они существенно зависят от начальных условий, но постепенно «забывают» их; «память» о них, а значит и долгосрочность прогноза ограничены и зависят от вида нелинейности. Противоборство разнонаправленных тенденций и характер связей (нелинейность) определяют «странность» динамики. Она в приложении к сложно устроенным и сложно функционирующим объектам (планетам, тектоническим структурам, минералам, организмам) рассматривается как проявление локальных (в масштабах Вселенной) нарушений второго начала термодинамики, задающего однонаправленность эволюции к «тепловой смерти».

Ускоренное разбегание вполне детерминистических изначально близких траекторий описывается функцией вида $e^{\lambda t}$, где t – время, $\lambda = 1/\tau$ – показатель Ляпунова, а τ – время Ляпунова: интервал времени, в течение которого эволюция системы от некоторых начальных условий в определенной мере предсказуема. Для хаотических систем λ – величина положительная по определению. Спустя достаточно продолжительное время (по сравнению с τ) память о заданном с некоторой конечной точностью начальном состоянии утрачивается, что уже не позволяет определять траекторию. Чтобы увеличить интервал предсказуемости, например, в десять раз, точность задания начального условия пришлось бы увеличить в e^{10} раз. В этих обстоятельствах неабсолютная точность измерений – решающее препятствие для предсказаний при любом уровне знания. Как оказалось, «...движение может стать столь сложным, а траектории столь причудливыми, что никакое сколь угодно точное наблюдение не позволит точно задать начальные условия» (Пригожин, Стенгерс, 2000, с. 76). В весьма общем случае предсказуема не отдельная траектория, не средняя в пучке траекторий, а лишь поведение всего пучка в целом. Взаимоналожение детерминистических свободных колебаний слабо-диссипативного сферического маятника и вынуждающих колебаний подвеса должно, казалось бы, породить очень простое движение, но результат нетривиален: несуммативен, хаотичен, непредсказуем.

Различить «истинно случайный» (стохастический) и «детерминистический» динамический хаос или регулярное (хотя, возможно, и сложное) поведение позволяют методы анализа временных рядов (Пригожин, Стенгерс, 1994; Шустер, 1988 и др.). Так, установлено, что вариации климата Земли за последние 900 тыс. лет порождены хаотическим аттрактором малой (4-5)

размерности (Nicolis, Nicolis, 1986). Хаотична последовательность инверсий геомагнитного поля в последние 600 млн. лет (Печерский, 1998). Показано также (Захаров, 2010), что временные ряды выделения сейсмической энергии обладают самоподобными свойствами в диапазоне более одного порядка по времени и по частоте.

НЕЛИНЕЙНОСТЬ И НЕОБРАТИМОСТЬ

«Стрела времени», по А. Эддингтону, или, точнее – «стрела процесса» (Гулидов, Наберухин, 2003), означает не только обыденно-очевидную направленность эволюции от прошлого к будущему, но и принципиальную невозможность строго реализовать в *этом* направлении тот же процесс в обратном порядке, поскольку потребляемая энергия постоянно диссипируется. «Мир горит как огромная печь; энергия, хотя она и сохраняется, непременно рассеивается» (Пригожин, Стенгерс, 2000, с. 105). Общее возрастание энтропии в процессах самоорганизации указывает на то, что в их основе лежит необратимость. Но она реализуема в условиях цикличности не синусоидальной, а нелинейной, детерминированно-хаотической. Одна из важнейших причин этого – неустранимые резонансные взаимодействия.

Компенсация диссипативных потерь постоянным поступлением энергии извне порождает незатухающие автоколебания, хаотические в случае нелинейных связей. В системах с сухим (нелинейным) трением автоколебания могут вызывать движения типа «прилипание – скольжение» (stick-slip), воспроизводимые в моделях генерации землетрясений (Turcotte, 1997; Захаров, 2011). Внешнее периодическое воздействие может «навязать» свою частоту и еще усложнить поведение системы.

В условиях неустойчивости и нелинейности малые возмущения порождают сложную хаотическую самоорганизацию и однонаправленность эволюции. Вероятностное описание оказывается неприменимо к отдельной траектории. Невозможны ни надежное прогнозирование будущего, ни реконструирование прошлого путем обращения скоростей.

НЕЛИНЕЙНОСТЬ И ЦИКЛИЧНОСТЬ

Для оценки соотношений нелинейности, хаотичности и цикличности принципиально важно, насколько значимо для конкретной решаемой задачи взаимодействие множества разнонаправленных факторов. Если этим можно пренебречь, то макроскопически – режим стационарный, квазиравновесный, но микроскопически – случайно-колебательный, флуктуацион-

ный, стохастически-хаотический; при некотором минимальном притоке энергии – ненаправленный (неисторический), макроскопически неизменный; без притока энергии – стремящийся к абсолютному равновесию («тепловой смерти»). При усилении притока энергии, даже равномерном, диссипативное структурообразование приобретает черты динамического хаоса, проявляясь в развитии нелинейности, порождающей последовательно периодические, затем все более сложные (хаотические) разномасштабные колебания.

По В.Е.Хаину и Э.Н. Халилову (2009), из алгебраически суммирующихся главных составляющих георазвития первостепенной является монотонная, направленно-поступательная компонента («стрела времени»), а цикличность – вторая по значимости, периодическая компонента, которая может быть изображена синусоидой. Она «...состоит из многопорядковых колебаний интенсивности различных геологических процессов, отраженных в циклических изменениях геологической среды...» (Хаин, Халилов, 2009, с. 98) и связана с пульсацией объема Земли.

Примечательна терминологическая многозначность характеристик этой компоненты: колебательность, цикличность, периодичность, синусоидальность, пульсационность. Помимо этого отмечена как третьестепенная еще и неравномерность, «более строго» определяемая как нелинейность, свойственная практически всем геопроцессам и обусловленная одновременным действием множества разнонаправленных факторов. Она, однако, в целом лишь «осложняет и затушевывает» направленность и цикличность (Хаин, Халилов, 2009, с. 99).

Здесь, а также во многих других работах на эту тему, очевидно, смешиваются разные причины, приводящие к нерегулярному характеру динамики системы: а) нелинейность как тип связи, вовсе не обязательно между многочисленными и разнонаправленными факторами; и б) одновременное действие множества разнонаправленных и взаимно *независимых* факторов, приводящее к вероятностному характеру проявления той или иной связи, вовсе не обязательно нелинейной.

Существенна степень осложненности и затушеванности. На небольшом временном удалении от исходного равновесия указанным фактором можно пренебречь, колебательный процесс можно считать периодическим. Это значит, что даже при наложении взаимно независимых разночастотных колебаний процесс принципиально прогнозируем и реконструируем; задача заведомо решается.

Иное дело, если система значительно удалена от состояния исходного равновесия и в ней устанавливается хаотический режим. Процесс опи-

сывается вполне детерминистическими уравнениями, решения которых характеризуются неупорядоченным поведением. Возможным оказывается вероятностное описание притягивающего состояния – аттрактора, но не положения отдельной траектории, исходящей из некоторых начальных условий, память о которых полностью утрачивается со временем.

Такая хаотичность в соответствии с современными представлениями рассматривается не как «чистая» разупорядоченность, а как сложная и системная организованность, не сводимая к суммированию частных влияний, к некоей средней траектории, а, следовательно, и принципиально непредсказуемая. Это отличает такие режимы от принципиально предсказуемых, даже очень сложных суммативных периодичностей с конечным числом мод в частотном спектре.

С такой точки зрения нелинейность не осложняет и не затушевывает колебательный режим, а качественно преобразует его. Оставаясь колебательным, он лишен строгой повторяемости, сильно ограничен (ляпуновским временем t) в прогнозе, – в отличие от периодичности, когда, снимая затушеванность и осложненность, можно выявить некую чистую, хотя и сложную, но принципиально прогнозируемую цикличность. Для нелинейных процессов это сделать невозможно: так в открытой диссипативной, самоподстраивающейся под внешние условия системе проявляет себя нелинейность.

НЕЛИНЕЙНОСТЬ, ХАОТИЧНОСТЬ И НЕПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ В ГЕОЛОГИИ

Чтобы установить линейность или нелинейность конкретного процесса, необходимо по определенным, выбранным, исходя из поставленной задачи и определенных теоретических установок, методикам, сделать – с определенной точностью, в определенном масштабе, за более или менее длительное время, в большем или меньшем количестве – необходимые измерения, зафиксировать и представить их результаты. В зависимости от всего этого один и тот же процесс можно представить как линейный или как нелинейный. Вопрос о том, каков исследуемый процесс в действительности, безотносительно к перечисленным выше факторам, не имеет смысла. Для успешного решения одних задач процесс можно рассматривать в одном («космологическом», «геологическом», «человеческом») масштабе времени и пространства как линейный (что исключает из рассмотрения неравновесность, неустойчивость, необратимость, самоорганизацию); при решении других задач, в другом масштабе такие аппроксимации могут приводить к неприемлемым ошибкам. В

свете этого правомерно говорить о линейной и нелинейной геодинатике, как о линейном или нелинейном приближении при рассмотрении геодинатических проблем.

Ознакомление с публикациями показывает, что геологи обсуждают не столько нелинейность как таковую, сколько одно из ее фундаментальных следствий, долгое время ускользавшее (и не только в геологии) от внимания исследователей. При достаточной удаленности от равновесия нелинейность порождает непрогнозируемую динамику, притом качественно отличную от давно известного стохастического хаоса: она представляет хаотическое поведение решений вполне детерминистических уравнений. Многие, если не большинство геодинатических систем, поведение которых предполагалось прогнозируемым, ведут себя *в принципе* непредсказуемо. Именно в этом, а не в недостаточности наблюдательных данных, главная причина ненадежности, например, сейсмического прогнозирования (Короновский, Наймарк, 2009). Дело не в том, что механизм подготовки сейсмического события изучен недостаточно; но сам механизм таков, что порождает непредсказуемую, хаотическую динамику. Это, конечно, не значит, что исследования по прогнозу сейсмичности бесперспективны и бесполезны: ведь неизвестно заранее, какие неожиданные результаты и следствия из них могут быть получены в будущем. Но такие исследования должны иметь статус фундаментальных, а не прикладных, обязанных «дать надежный прогноз» того, что объективно не поддается прогнозированию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осложненность, затушеванность нелинейностью цикличности означали бы лишь количественную, но не качественную измененность последней, а также ее некую первичность по сравнению с нелинейностью. То, в каких отношениях и пространственно-временных масштабах проводятся такие сравнения, определяется исследователем в зависимости от решаемой задачи. В задачах прогнозирования и реконструирования эндогенных (не обще- и межпланетарных) процессов такой масштаб – «геологический», а отношение – историчность.

Геологию единодушно считают наукой исторической. Исторична ли цикличность? Любое движение, по определению, направленно, но в случае, например, периодичности, оно после исходной точки – простое воспроизведение самого себя. В ходе такого движения не рождается ничего нового: нет событий, нет скачков с теоретически детерминированным, но практически непредсказуемым выбором – вниз или

вверх, вправо или влево. Все предопределено на бесконечность в будущее, и обратимо к исходной точке, где только и мог быть сделан выбор: назад или вперед. После этого все последующее прогнозируемо и реконструируемо — точно или статистически, без сильной зависимости от начальных условий и текущих флуктуаций.

Нелинейность в общем случае не осложняет и не затушевывает, а качественно преобразует периодическую цикличность, даже при детерминированности эволюции делая ее непредсказуемой и невоспроизводимой, тем самым придавая ей событийность, подлинную историчность. Направленность и цикличность не исчезают, но первая теперь оказывается необратимой, а вторая — неповторимой на каждом новом витке. Фазовая траектория блуждает от аттрактора к аттрактору, никогда не возвращаясь в уже оставленный, в каждом из них полностью забывая прежние начальные условия, а при выходе из него начиная зависеть от новых — до попадания в следующий аттрактор.

Неравновесность, диссипативность, самоорганизованность, необратимость саморазвития, несуммативность разномасштабных цикличностей, нетривиальность резонансных взаимодействий с несомненностью указывают на нелинейность как не третьестепенную, лишь «осложняющую» и «затушевывающую», а фундаментальную закономерность, неотъемлемый атрибут эволюции Земли на всех масштабных уровнях и этапах ее внутреннего строения и развития. Тем самым ставятся под вопрос фундаментальность синусоидальной цикличности и ее алгебраическая суммируемость с направленностью, что имело бы место в условиях линейности.

Список литературы

- Анищенко В.С.* Знакомство с нелинейной динамикой. Москва — Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 144 с.
- Гулидов А.И., Наберухин Ю.И.* Существует ли «стрела времени» // Философия науки. 2003. № 2 (17). С. 3-15.
- Захаров В.С.* Динамические и фрактальные характеристики временных рядов выделения сейсмической энергии // Нелинейный мир. 2010. № 4. С. 234-242.
- Захаров В.С.* Модели сейсмотектонических систем с сухим трением // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2011. № 1. С. 22-38.
- Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1988. 176 с.
- Короновский А.А., Наймарк А.А.* Прогноз землетрясений — реальная научная перспектива или вызов науке? // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2009. № 1. С. 12-22.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 613 с.
- Методы теоретической геологии. Л.: Недра, 1978. 335 с.
- Наймарк А.А.* Сценарий возникновения тектонодинамического детерминистского хаоса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2003. № 5. С. 22-31.
- Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного. Введение. М.: Мир, 1990. 342 с.
- Новое в синергетике. Загадки мира неравновесных структур. М.: Наука, 1996. 263 с.
- Печерский Д.М.* Палеомагнетизм неогена — отражение процессов у ядра и на поверхности Земли // Russian Journal of Earth Sciences. 1998. V. 1. № 2. P. 105-140.
- Пригожин И., Стенгерс И.* Время, хаос, квант. М.: Прогресс, 1994. 265 с.
- Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 312 с.
- Пуцаровский Ю.М., Новиков В.Л., Савельева А.А., Фадеев В.Е.* Неоднородности и конвекция в тектоносфере // Геотектоника. 1999. № 5. С. 3-8.
- Хаин В.Е.* Земля — уникальная планета солнечной системы // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 9. С. 822-829.
- Хаин В.Е., Халилов Э.Н.* Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М.: Научный мир, 2009. 520 с.
- Шустер Г.* Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988. 240 с.
- Anderson D.L.* Plate tectonics as a far-from-equilibrium self-organized system // Plate boundary zones. Geodynamic series Mon. 30. 2002. Amer. Geophys. Union. P. 411-425.
- Nicolis C., Nicolis G.* Reconstruction of the dynamics of the climatic system from time-series data // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1986. V. 83. P. 536-540.
- Turcotte D.L.* Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge, Cambr. Univ. Press, 1997. 398 p.

НАЙМАРК, ЗАХАРОВ
**RATIOS OF DIRECTION, CYCLICITY
AND NONLINEARITY IN GEOLOGICAL PROCESSES**

A.A. Naimark, V.S. Zakharov

The Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991; e-mail: fnaim@ya.ru

Geology is a historical science. But linear direction and cyclicity (periodicity) are unhistorical: this is a simple self-reproducing process. Such geologic evolution would not give birth to anything new; there would be no qualitative leaps - reorganizations, geocataclysms, unpredictable choice of diverging ways of evolution. Everything is predetermined on infinity in the future, and reversible to the initial point where the choice could only be made. After that, all subsequent things are predictable and reconstructable - precisely or statistically, without strong dependence on initial conditions and current fluctuations. Recognition of instability and mono-directionally-irreversible, self-similarly-discrete, self-organized-and-cyclic, bifurcational character as main features of geologic evolution with obvious inevitability implies nonlinearity - not as the insignificant tendency which only "shades and complicates" a linear trend and cyclicity, but as the global law, the inherent attribute of evolution of the Earth at all stages and scale levels.

Keywords: geologic evolution, determined chaos, nonlinearity, irreversibility, nonequilibrium, instability, cyclicity.