

## Дискуссии

УДК 551.2.01

### МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ НА КРИТИЧЕСКОМ РУБЕЖЕ ПРИМЕНИМОСТИ

© 2013 Н.В. Короновский, А.А. Наймарк

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

В свете концепций фрактальности строения и нелинейности эволюции геологической среды проанализированы теоретические основы традиционных методов геодинамического реконструирования и прогнозирования. Показано, что пределы их научно-практической применимости решающим образом определяются чувствительной зависимостью поведения нелинейных неравновесных геодинамических систем от начальных условий и неконтрастной выделенностью литосферных аномалий разных рангов. Динамика обсуждаемых процессов разрывообразования и сейсмичности существенно хаотична и непредсказуема; это следствие их природы, а не слабой изученности. Формирование парагенетических структурных ансамблей, аномальных концентраций тектонических напряжений, структурно-динамическая подготовка и предвестники землетрясений реальны. Но для хаотических геосистем с экспоненциальной расходимостью изначально близких путей эволюции вероятностные описания несводимы к средней траектории, а измерения сколь угодно точные не приводят к детерминистическим предсказаниям геокатастроф. Теоретические основы и методы динамической геологии требуют фундаментальной корректировки.

*Ключевые слова: динамическая геология, методы, геосреда, нелинейность, фрактальность, напряжения, разрывы.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Неоднородность, дискретность, необратимая изменчивость геологической среды повсеместны и вполне очевидны. Тем удивительнее стойкая традиция изучать ее строение и развитие на основе концепций сплошности, однородности, регулярной повторяемости, что порождало неоднократно обсуждавшиеся проблемы (Гзовский, 1975; Гольдштейн, Осипенко, 1993; Дискретные..., 1989; Николаев, 2003; Осокина, 1989; Ребецкий, 2008; Садовский и др., 1987; Семинский, 2003; Шерман, 2012 и др.).

Парадокс легко объясним: так работать проще. Мощный аппарат механики, упрощая, усредняя, линеаризуя, успешно обходит любые препятствия на пути к интуитивно ясным постулатам непрерывности, линейности, обратимости, выдавая строгие и устойчивые решения весьма

сложных задач. Подмены сложной реальности упрощенными моделями, нерешаемых задач — решаемыми, оправданны практикой.

Но уступать «очарованию простоты» (Николаев, 2003) в решениях на основе линейных моделей допустимо далеко не всегда. Существует критический рубеж, для каждой задачи свой, за которым игнорировать неоднородности, несплошности и связанные с этим нелинейности, неустойчивости, необратимости уже нельзя, ибо возникающие погрешности и непредсказуемости обесценивают получаемое решение.

Подобные критические рубежи в науке — признаки не тупика, а перехода к новой парадигме, к фундаментальной корректировке теоретических основ, определяющих пределы применимости традиционных методов. Это и происходит сейчас в динамической геологии (Наймарк, Рябухин, 2010), где использование простых

подходов нередко порождает иллюзию легкости получения значимых достижений, которые на деле оказываются лишь недостаточно обоснованными предположениями. Как отметил А.В. Николаев (2003, с. 9), «...очарование линейной модели приносит все более очевидный вред развитию геофизики». Принять это во внимание следует и геологам.

Данная статья обобщает результаты многолетних исследований авторов по отдельным аспектам рассматриваемой проблемы.

### О ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВАНИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

Традиционные методы структурно-геодинамического анализа исходят из сравнительно простых, но эффективных для многих задач геометрических и кинематических соотношений потенциальных дислокаций в абстрактной сплошной геосреде. Реальная же среда под нагрузкой ведет себя как дискретная, обнаруживая более сложные механизмы и закономерности взаимного расположения и ориентаций структурных элементов, тектонических смещений и осей напряжений, нелинейность и непрогнозируемость геодинамических процессов.

Общепонятно, например, что сквозное раскалывание однородно нагруженного объема невозможно *абсолютно одновременно* по двум или большему числу сечений. Оно происходит всякий раз по некоторому одному из теоретически возможных сечений, наиболее разупрочненному к данному моменту (позже раскалывается уже не прежний объем, а образовавшиеся отдельно). Это означает, что в любом деформируемом объеме при любой ориентации осей напряжений непременно должно найтись такое сечение. Установив как можно раньше и точнее его местоположение и характер нагружения, получим, казалось бы, уверенный прогноз места скалывания. А выявив там еще и обособленный крупный зацеп, сможем предсказать место гипоцентра и энергию будущего землетрясения, воссоздать исходные динамические условия по характеру порожденной ими структуры. Оправданны ли подобные ожидания? Сомнения, возникшие у исследователей еще в 70-80-х гг. прошлого века (Садовский, 1979), к настоящему времени не рассеялись, а укрепились.

Как уже давно установлено в механике, ориентации плоскостей скалывания в однородно нагруженном объеме предопределены направлениями осей напряжений и соотношениями пределов прочности материала на сжатие и растяжение. Значения напряжений, как и других механических величин — результат осреднений по

пространству с заменой в исследовании реальной несплошной, неоднородной среды модельной аструктурной, сплошной. Такая замена правомерна в тех случаях, когда отклонения размеров реальных неоднородностей от среднего значения множественны, случайны и в большинстве не превышают некоторой допустимой для данной задачи малой погрешности.

Обычно принимали, что при более чем 10-кратном превышении величины массива, толщи, разрыва над размерами их структурных элементов (слоев, зерен, трещин, пор) исследуемый объем можно считать сплошным, а соотношения напряжений, деформаций, разрывов — характерными для однородного напряженного состояния (Гзовский, 1975). Но в современной механике деформирования и разрушения квазисплошным считают массив, в изучаемой области которого можно выделить элементарные объемы представительные по свойствам, а по характеру напряженно-деформированного состояния сводимые к точке при допустимой погрешности до 15% (Баклашов, 1988). Этому отвечают соотношения размеров изучаемой области и элементарного объема не менее чем 45:1, а элементарного объема и структурного элемента массива — не менее, чем 10:1, когда физически существующие неоднородности механически незначимы, пренебрежимы. Существование квазисплошного, относительно однородного «фона» с отчетливой выделенностью на нем вещественных, структурных, динамических «аномалий» традиционно считается необходимой предпосылкой для обнаружения структурных парагенезов, а также связанных с ними очагов готовящихся землетрясений и месторождений полезных ископаемых.

В однородно нагружаемой сплошной среде выбор одной плоскости скалывания из теоретически равновозможных был бы неосуществим. Допустив же для какого-то объема наличие единичного разупрочненного сечения, нужно то же принять и для любой из его отдельностей. Отсюда — неизбежность иерархического строения любого объема, многоактности и стесненности подвижки по любому сечению в нем. Действительно, в интенсивно нагружаемых телах возникают блоки разных рангов. При этом соотношения размеров вмещающего блока ранга R и вмещаемых блоков ранга R+1 всего лишь 5÷2:1, в среднем 3.5:1 (Садовский и др., 1987). В подобной грубодискретно- и самоподобно-блоковой (фрактальной) среде нельзя выделить объем ни представительный по свойствам, ни сводимый к точке, а изменения напряженно-деформированного состояния могут быть столь значительны, что использование осредненных оценок приведет к ошибкам порядка самой величины. Ни «фоновой» однородности, ни четкой

выделенности аномалий одного или нескольких рангов в такой структуре, как правило, нет, а нелинейные, бифуркационные процессы ее эволюции непредсказуемы и необратимы.

Таким образом, даже минимальное начальное отступление от модели сплошной среды к дискретной вызывает цепочку следствий, принципиально меняющих простую в традиционных моделях картину структурообразования; а без такого отступления оно физически нереализуемо (Наймарк, 2001). С этих позиций рассмотрим теоретические основания некоторых широко известных методов динамической геологии.

### РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ ПО ОРИЕНТАЦИЯМ И КИНЕМАТИКЕ ПЕРВИЧНЫХ СКОЛОВ

По единичному макросколу восстановить ориентации осей главных нормальных макронапряжений при неизвестных значениях угла скалывания и параметра  $\mu_\sigma$  (Лодэ – Надаи) невозможно. Поэтому статистически анализируют ориентации множества «микросколов», принимая, что они: а) заложены по случайно распределенным изначально разупрочненным площадкам, б) динамически взаимно независимы и отклонены от оси макронапряжений  $\sigma_3$  не более, чем на  $\pm 45^\circ$ .

Но в реальной геосреде смещения одновременные по сочлененным микро-, мезо- и макро- структурным ослаблениям в локальных полях напряжений взаимно стеснены и отклоняются от теоретических векторов максимальных касательных макронапряжений  $\tau_n$ , которые были бы на изолированных площадках. Статистическое распределение величин таких отклонений полимодально: нормальное распределение указывало бы на одноранговость сколов, а значит и на квазисплошность среды. В этих условиях по сместителю крупного скола могут перемещаться не только два сомасштабных макроблока, но – одновременно по другим разнонаклонным сместителям – и множество более мелких разнонаклонных отдельных. Каждая из них может оставлять на общем для них макросместителе борозды собственных ориентаций, в общем случае не совпадающих с теоретическим вектором макронапряжений  $\tau_n$ , и, возможно, перекрещивающихся даже при постоянном макроскопическом  $\mu_\sigma$  из-за взаимной стесненности подвижек (Наймарк, 1995а).

Основываясь только на кинематике и геометрии сколов, пусть формально и разрешенных для некоторой ориентации осей главных макронапряжений, без учета разноранговости дислокаций и соответствующих локальных полей напря-

жений, можно реконструировать «общее» для них (осредненное), но, тем не менее, фиктивное региональное поле напряжений. Для реконструкции истинных полей напряжений обязательна предварительная ранговая идентификация анализируемых сколов различных размеров и ориентаций на основе других признаков, прежде всего – по площади не суммарных, а наиболее поздних смещений. Но это трудно из-за малоконтрастных различий размеров разноранговых блоков при больших разбросах внутриранговых значений.

Важно и то, что сдвигание сопровождается как переориентациями материальных линий внутри блока, так и поворотом его как целого вместе со сформировавшимися в нем разрывами. Из-за этого сколы, связанные, например, с макронапряжениями, могут переходить из числа разрешенных для них в запрещенные, а первично запрещенные воспримутся как разрешенные, якобы пригодные для реконструкции осей напряжений, к которым они не имели отношения. Для надежной разбраковки ориентаций сколов на первично разрешенные и запрещенные необходимо знать историю сдвигов и поворотов каждого блока на каждом масштабном уровне, что нереально. Но и узнав это, мы получили бы оси макронапряжений не обязательно тех, что были перед макроскалыванием, или постсдвиговых, сохранившихся донныне, но тех, что возникали в момент подвижки из-за случайной ее стесненности.

Таким образом, необходимые для корректного решения поставленной задачи ранговые идентификации разнонаправленных смещений и статистический анализ их ориентаций в полиранговой грубодискретной среде сложны или невозможны.

### РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ВТОРИЧНЫМ РАЗРЫВНЫМ НАРУШЕНИЯМ

Поля напряжений реконструируют также по нарушениям, возникшим в зоне возмущения исходного поля некоторым первичным разрывом. Геометрические и кинематические соотношения таких нарушений между собой и с первичным разрывом определяются конкретной динамической обстановкой. Результаты теоретического и экспериментального моделирования (Осокина, 1989) позволили наметить алгоритм реконструкции обстановок в зоне динамического влияния, в частности, стесненного по простиранию первичного сдвига. Если, например, по одну сторону оконечности субвертикального разрыва с неустановленным направлением сдвига вторичные нарушения подходят

к нему под углами, близкими к прямому, то, по Д.Н. Осокиной (1989), это равновозможно в четырех исходных обстановках: одноосное субгоризонтальное сжатие под  $45\pm 45^\circ$  к плоскости разрыва (обстановка IA); то же – с более слабым сжатием по другой оси (IB); субгоризонтальное сжатие под  $135\pm 45^\circ$  к плоскости разрыва с умеренным субвертикальным сжатием (IIA); то же – с сильным субвертикальным сжатием (IIB).

Конкретизация решения требует дополнительных данных о морфокинематике вторичных нарушений. Это позволяет восстановить геодинамические обстановки, неодинаковые по ориентации оси максимального субгоризонтального сжатия, а значит, и по направлению реконструируемого первичного сдвига. Если вторичные нарушения – сдвиги, то реконструируются обстановка IA, IB и первичный левый сдвиг; если сбросы или раздвиги, то – обстановка IIA или IIB и правый сдвиг.

Для дальнейшей конкретизации нужно установить расположение и ориентации вторичных разрывов по другую сторону той же оконечности первичного разрыва. Если они диагональны по отношению к нему, то реконструируется обстановка IIA, если субпараллельны – IIB. По диагональности или субпараллельности в обстановках I реконструируются соответственно типы IA или IB. Аналогична логика реконструкций при иных соотношениях первичных и вторичных разрывов.

Из сказанного, казалось бы, ясно, какие данные необходимы и достаточны для однозначной реконструкции исходных геодинамических обстановок и какие возможны ошибки при неполных данных. Однако, предлагаемые эталонные модели применимы, лишь если нарушения, полагаемые вторичными, таковы на самом деле, т.е. они более высокого ранга, чем первичный разрыв, притом производны от него. Подтвердить это только ориентационным соответствием модельных нарушений реальным недостаточно: последние могут быть не вторичными, а относиться к иным рангам или к более древним циклам разрушения. Надежно установить это в крупном породном массиве трудно или даже невозможно. По размерным соотношениям ранг разрывов определим тем надежнее, чем меньше различия одноранговых разрывов и чем больше – разноранговых. Но размеры сквозного нарушения в одном и том же объеме могут варьировать очень сильно. Средние же размеры пригодны как критерий, лишь если для объемов смежных рангов они различались бы в 10 раз или более (в реальности 3.5:1). Но одноранговые объемы сами разновелики. Важно и то, что в трехосно нагруженном объеме при небольших различиях величин главных нормальных напряже-

ний даже их малые случайные флуктуации могут приводить к переиндексации осей, к неоднократным и непредсказуемым переориентациям пар сопряженных сколов, к перестройкам ансамблей вторичных нарушений (Наймарк, 1999).

Таким образом, в окрестностях любого естественного первичного разрыва среди множества разновеликих и разновозрастных нарушений всегда можно в качестве вторичных ошибочно выбрать разрывы, лишь случайно сходные с истинными вторичными по одному-двум необходимым, но не достаточным признакам – в чисто формальном соответствии с эталонными модельными ситуациями. В результате можно получить фиктивное поле напряжений, с которым не могли быть связаны фактические подвижки по первичному разрыву. Прямая проверка правильности реконструкций наблюдениями или измерениями в крупном массиве невозможна. Косвенные же признаки сами интерпретируются в зависимости от принятых допущений о сплошности или дискретности геосреды и о физических механизмах разрывообразования в ней.

#### АНАЛИЗ ПАРАГЕНЕЗОВ ПЕРВИЧНЫХ И ВТОРИЧНЫХ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

Вышеказанное позволяет представить соотношения условных микро- (ранг IV; далее слово «ранг» для краткости опущено), мезо- (III), макроразрывов (II), предшествующих сквозной (дихотомической) дезинтеграции нагружаемого мегаобъема (I). Пусть некоторый «микроразрыв» расколлот сомасштабный ему объем IV. Вмещающий его мезообъем III испытает сквозное раскалывание лишь после достижения критической плотности размещения микронарушений. Их совокупность в некоторой общей для них механической обстановке правомерно считать межранговым парагенезом IV/III. За это время ранние микроразрывы могут испытать бóльшие или меньшие повороты. Появление первого мезоразрыва III начинает формирование парагенеза III/II, завершаемое к моменту образования первого сквозного макроразрыва II. Одновременно отдельные разрывы III претерпевают искривления, повороты, а в парагенезе IV/III меняется взаиморасположение составляющих его нарушений. Последние сами продолжают искривляться и переориентироваться; возникают и новые микроразрывы. Начавшееся формирование парагенеза IV/III прерывается возникновением упомянутого макроразрыва II, либо завершается появлением нового мезоразрыва III. При этом образование любого разрыва разгружает сомасштабный ему объем и перестраивает поля напряжений во вмещаемых объемах; затем вновь от микроуровня начинается разрушение



нового цикла. В ходе такого реверс-каскадного процесса формируется многоуровневый, самоподобно организованный «парагенез парагенезов» — ансамблей докритического и закритического нагружения, и единичных разрывов, возникших в моменты критического нагружения объемов того или иного ранга (Наймак, 1998а).

Бифуркационные эффекты проявляются в том, что, во-первых, объем любого ранга дихотомически раскалывается, случайно «избирая» одно сечение из теоретически равноблагоприятных — после серии высокоранговых и перед последующими низкоранговыми каскадами разрушения с соответствующими пространственно-возрастными соотношениями дислокаций. Во-вторых, как отмечалось, на любом структурном уровне возможны непредсказуемые скачкообразные переориентации систем сопряженных сколов и ансамблей закритических нарушений. В-третьих, после образования макроразрыва более поздние нарушения могут формироваться в участках как локально возмущенного, так и невозмущенного первичного поля напряжений, соответственно по-разному ориентируясь относительно ранее образовавшихся структур.

Ясно, что для воссоздания исходной геодинамической обстановки по возникшей в ней структуре нужна ранговая идентификация как отдельных разрывов, так и парагенетических ансамблей. Но в массиве поперечником 50-60 км, где при межранговом соотношении размеров блоков 3.5:1 будет 15-16 рангов, такая идентификация ненадежна. Упрощенность публикуемых карт разрывных парагенезов для обширных, сложно устроенных территорий может объясняться: а) осознанно или неосознанно предвзятым отбором разрывов, ориентированных и расположенных в формальном соответствии с эталонными схемами в неактуальных ныне моделях строения геосреды и механизма разрывообразования в ней; б) недооценкой трудностей возрастной, ранговой и типологической идентификации разрывов и их сочетаний во фрактальной геосреде.

#### АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ И ПРОБЛЕМА ПРОГНОЗА СЕЙСМОГЕННОГО МАКРОСКАЛЫВАНИЯ

Традиционно считается, что сейсмогенное скалывание реализуется по структурно ослабленным зонам ранее возникших разрывов, и надежно прогнозируемо там, где они размерами и разупрочненностью четко выделяются на относительно однородном структурном фоне. Но, как упоминалось, естественные разрывы возникают лишь после предварительной реорганизации среды. Окрестности некоторой начальной дис-

локации структурируются в ходе ее собственного разрастания. Ход процесса определяется не осредненными реологическими характеристиками, а взаимодействием множества растущих и взаимосочленяющихся разрывов в непрерывно изменяемых ими локальных полях напряжений. При достижении некоторой критической нарушенности дальнейшая дезинтеграция стягивается к одному, заранее не предсказуемому сечению, ориентированному в общем, низкоранговом поле напряжений соответственно теоретической модели потенциального скалывания в сплошной среде. Итоговый дизъюнктив, вначале неровный, осложненный изломами на ответвлениях и сочленениях с другими разрывами, соединив края нагруженного объема, становится наиболее эффективным стоком закачиваемой извне энергии — с лавинным раздроблением и катастрофическими срывами неровностей. В его окрестности возникают области разгрузки напряжений; там разрушение затухает. В дальнейшем, по мере спрямления разлома и при неизменности ориентации осей макронапряжений, сдвигания становятся криповыми, асейсмичными. Прогнозируемо сейсмогенными они были бы при осложненности разлома единичными, отчетливо обособленными крупными зацепами, обеспечивающими накопление упругой энергии, а при срыве того или иного из них — резкое начало сейсмической подвижки.

Это возможно при переориентации осей макронапряжений, когда активность крипового разлома ослабевает, а подсекающие нарушения более позднего цикла блокируют его для новых подвижек. Спрямленный разлом осложнится, но не единичными и отчетливо обособленными, а множественными разномаштабными зацепами (узлами). При этом крупные зацепы неконтрастно отличны по упрочняющей роли от «средних», а те — от мелких, так, что нет четкого разделения на фоновую и аномальную зацепленность. Одновременно активизируются и разрастаются другие разрывы. Точные сравнительные оценки зацепленности берегов всех конкурирующих потенциально сейсмогенных разрывов на их конкретных отрезках, глубинах и временных интервалах нереальны. Традиционные представления о редких крупных сейсмогенных узлах и протяженных асейсмичных слабошероховатых отрезках разломов несостоятельны. Надежно выделить потенциально сейсмогенные разломы и наиболее опасные их участки невозможно (Наймак, 1995б).

С учетом иерархичности геосреды и постоянства удельной объемной плотности сбрасываемой при землетрясениях упругой энергии, сколовая дезинтеграция, порождая, например, довольно частые землетрясения 13-14 классов, должна

затем для возбуждения землетрясения 18 класса, т.е. в диапазоне магнитуд приблизительно от 8 и выше, сместиться в иерархической структуре литосферы не менее, чем на три-четыре ранга. Но для этого процесс реверс-каскадного разрушения должен пройти множество циклов, а в каждом из них – множество точек бифуркаций. Следствие этого – лавинно нарастающая непредсказуемость перестроек полей напряжений, структуры, потенциальной сейсмогенности разрывов разных рангов, ненадежность краткосрочных прогнозов землетрясений.

При прочих равных условиях предсказуемость размещения зон макроскалывания некоторого ранга тем выше, чем ближе последний к наименьшему, глобальному уровню, на котором сейсродинамическая система может рассматриваться как закрытая и, следовательно, относительно устойчиво локализованная. При значительном масштабном отличии от глобального уровня, из-за частых непредсказуемых перестроек условий разрывообразования, прогноз сейсродинамических структур с требуемыми точностью и надежностью маловероятен или нереален.

#### АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ПОЛЯ СЕЙСМОПРОГНОЗИРУЕМОСТИ

В равномерно- и мелкоблоковой структуре с единичным пересечением (узлом) двух макроослаблений, одно из которых в точке пересечения осложнено макрозацепом, поле надежной прогнозируемости места сейсродинамического срыва непрерывно и ничем не ограничено (Наймарк, 1997а). На таком же структурном фоне, но с большим числом пересекающихся макроослаблений, надежная прогнозируемость сохранится до середины расстояния между ближайшими узлами (далее, при встречном перекрытии полей прогноз становится ненадежным). В подобной среде можно выделить такие макрообъемы, что, соответствуя в каждом случае полю надежной прогнозируемости лишь единичного узла, они в совокупности, примыкая один к другому, займут любое пространство.

При наличии мезоструктурных элементов, не контрастно отличных от заведомо асейсмичных микроузлов и от потенциально сейсродинамических макроузлов, поля надежной прогнозируемости вокруг каждого макроузла будут разделены пространствами, где невозможны ни определенно положительные, ни определенно отрицательные прогнозы. Подобная прерывистость тем больше, чем больше число уровней с узлами ненадежно оцениваемой сейсродинамичности. При переходе от крупных к все более мелким структур-

ным элементам участки надежной прогнозируемости будут множиться, но их размеры – уменьшаться. В результате структура полей надежной прогнозируемости на любом структурном уровне будет самоподобной «дырчатой», нецельнообразной – фрактальной.

Прогноз расположения конкретного реального сейсродинамического узла всегда включает случайную ошибку относительно его среднего положения в модельной сетке ослаблений данного структурного уровня, ошибку тем более вероятную, чем она меньше. При длительном функционировании системы приуроченность реальных сейсродинамических срывов к средним положениям прогнозируема с некоторой вероятностью – при неизменности местоположения, формы и размеров вмещающего объема. Но при их изменении – всякий раз в некоторый непредсказуемый момент в непредсказуемом направлении – вмещаемые объемы не только перегруппируются, тяготея к новым средним положениям, но и переместятся коллективно. В прогноз, если его основывать на местоположениях уже происшедших срывов (форшоков), войдет, помимо упоминавшейся случайной, еще и соответствующая систематическая ошибка. При множественности подобных перестроек узлы самого вмещающего объема со временем группируются вокруг средних положений в более крупном массиве, а ранее образовавшиеся двухуровневые скопления мест срывов будут формировать скопления еще более крупного размера. При этом всякий раз амплитуда коллективных перемещений, а значит и перестройки напряжений на множестве других сомасштабных узлов возрастают. Возникает фрактальное распределение сейсродинамичности, давно установленное исследователями эмпирически.

Для отслеживания и своевременной фиксации скапливания форшоков того или иного ранга необходим мониторинг с весьма высоким пространственно-временным и размерно-ранговым разрешением в отношении как отдельных сейсродинамических срывов, так и их разновеликих скоплений. При этом существенны соотношения величин: разброса положений отдельных срывов вокруг их среднего положения в скоплении определенного ранга, а также разброса центров относительно мелких скоплений вокруг их среднего положения в скоплении более крупного ранга. Оценки зависят от размерного соотношения разноранговых структурных элементов. Если такие соотношения менее 10:1, например, 3:1, ранговая разбраковка затруднительна, особенно при недостаточно длительном функционировании системы, когда сильное землетрясение происходит раньше появления отчетливого скопления форшоков соответствующего структурного уровня.

Существенна и дробность размерных соотношений, например, не 3:1, а 3.5:1, как это характерно для геологической среды. Тогда в модели размещение стандартных (целых) объемов не только случайно варьирует около их средних положений, но и «пустоты» – нестандартные (дробные) вмещающие объемы – располагаются между целыми случайным образом. Сомасштабные им дизъюнктивные узлы всякий раз будут испытывать некоторые коллективные смещения, время от времени случайно появляясь в новых местах, так что число возможных мест расположения узлов и сейсмических срывов со временем возрастает. При непродолжительном функционировании системы неотчетливо выраженные скопления срывов могут проявляться в непредсказуемых местах, или не успеть проявиться вовсе. Для формирования отчетливого скопления требуется некоторое характерное время, в общем случае тем большее, чем крупнее элементы данного структурного уровня. Но оснований рассчитывать на непереносное выполнение этого условия и на надежный прогноз, конечно, нет.

Итак, существенно хаотическое, непредсказуемое поведение нелинейных открытых сеймотектонодинамических систем неизбежно проявится при нагружении среды с грубодискретной фрактальной структурой. Но именно такие особенности присущи геологической среде (Захаров, 2011; Наймарк, 1997б, 2006; Садовский и др., 1987). Очевидно, надежда получить точный и надежный краткосрочный прогноз конкретных сейсмических событий на основе как традиционных, так и новейших моделей геологической среды и соответствующих им теоретических моделей механизмов разрушения – иллюзорна.

### АНАЛИЗ ПРЕДВЕСТНИКОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ

В поисках предвестников землетрясений анализируют высокочастотные флуктуации, низкочастотные «бухтообразные» аномалии во временных рядах значений изучаемых параметров, согласованное поведение геофизических полей как признак агрегирования блоков земной коры перед будущей катастрофой. Исключая изменения, обусловленные воздействиями сезонных, приливных, глобальных и внеземных факторов, ожидают обнаружить стадии невозмущенного однородного фона, затем – единичной, отчетливо обособленной аномалии-предвестника с завершающим ее сильным землетрясением, затем – восстановленного фона. Но выявляется и множество других, предшествующих и последующих аномалий нескольких рангов, не всегда значимо отличимых по форме, ампли-

туде и длительности от искомой. Появление, поведение и характер аномалий-предвестников перед сильными сейсмическими событиями неустойчивы. Уверенно выделить наиболее созревший очаг не удастся; место и время разрушительных землетрясений даже в хорошо изученных регионах всякий раз оказываются неожиданными. Ненадежность ранговой идентификации потенциально сейсмогенных разрывов и аномалий-предвестников в грубодискретной фрактальной геосреде – причина неудач краткосрочного сейсмопрогнозирования любыми методами (Короновский, Наймарк, 2009, 2012; Koronovsky, Naimark, 2011).

Но и отчетливая крупная аномалия не означает, что катастрофа неизбежна. В силу чувствительности поведения системы к изменению условий даже слабое отдаленное землетрясение может непредсказуемо спровоцировать как форсирование, так и затухание подготовки созревающего очага. Постоянно возникает множество разных по природе и силе импульсов, так что невозможно ни предвидеть, ни надежно определить, с которым из них может быть связана перестройка в системе и в какой конкретно форме она проявится. Учитывая, что, по (Bak, Tang, 1989), «землетрясения – феномены самоорганизованной критичности» геодинамической системы, поиски определенного предвестника или их набора не могут не быть тщетными. Какой бы признак опережающего созревания одного из потенциальных очагов ни был избран, он может даже на коротких интервалах времени попеременно указывать на разных «кандидатов», взаимно конкурирующих в ходе отнюдь не монотонно развивающейся динамической и структурной подготовки.

Неустраняемая множественность, нечеткая различимость как действительных, так и мнимых предвестников объясняют ненадежность выделения наиболее зрелых и крупных потенциальных очагов. Оценка качества конкретного прогноза, возможная лишь по истечении его срока, не гарантирует его надежности в дальнейшем. Бифуркационность сейсмического и других природных процессов закрывает путь к краткосрочным прогнозам геокатастроф. Совершенствование инструментов и методов познания сложных систем не приводят к прогнозам их функционирования с требуемой точностью и надежностью.

### АНАЛИЗ ОСНОВ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В целях прогнозирования сейсмичности сопоставляют с ее проявлениями возмущения поля напряжений  $\tau_{\max}$ , получаемые при нагру-

жении блока квазисплошного модельного материала с разрывами, имитирующими реальную структуру. При этом считают допустимым пренебречь мелкими нарушениями. Это означает, что моделируемый процесс полагают слабо зависимым от малых вариаций начальных условий, то есть линейным. Концентрации напряжений на окончаниях и сочленениях (узлах) разрывов четко обособлены на однородном фоне и устойчиво воспроизводимы.

Но в такой модели не соблюдено подобие реальной грубодискретной структуре, где скачкообразного перехода от грубодискретной среды к квазисплошной в общем случае нет, а макроаномалии поля напряжений не контрастно отличаются от разновеликих мезоаномалий. Задание в эксперименте более адекватной, фрактальной начальной структуры приводит к неустойчивым результатам, вероятность совпадения которых с реальным стремится к нулю. Состояние модельных разломов, пусть и отвечающих природным по ориентации и расположению, непредсказуемо варьирует в зависимости от малейших деталей их предыстории. Так же изменчивы расположения и конфигурации аномалий поля напряжений, их соотношения с происшедшими и прогнозируемыми землетрясениями.

Принципиальная невоспроизводимость реальной последовательности отдельных актов структурообразования — следствие самоорганизованной критичности фрактальной среды в условиях сильной неравновесности.

Структура модельной среды не может быть подобна реальной во всех деталях. Но именно они из-за чувствительности поведения нелинейной системы к начальным условиям, задаваемым всегда с некоторой конечной точностью, обуславливают неустойчивость и неадекватность экспериментальных результатов (Наймарк, 2009).

#### АНАЛИЗ ОСНОВ СТРУКТУРНО-ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Условие идентификации природных структурных парагенезов — наличие эталонных моделей, отражающих особенности структурных ансамблей, связанных с конкретными динамическими обстановками. Учитывая сказанное ранее, следует исходить из того, что никакой естественный макроразрыв не образуется непосредственно в изначально квазисплошной среде. Она на стадии предразрушения непременно перестраивается в грубодискретную фрактальную, где возникают, а затем и соседствуют с итоговым макроразрывом, множественные разновеликие микро- и мезомасштабные «первичные» и «вторичные» нарушения. Любая искусственная структура, задаваемая в квазисплош-

ном материале, неизбежно искажает в эксперименте ход и результаты реального деформирования и разрушения ввиду сильной зависимости процесса от малейших различий модельной и природной структур (Короновский, Наймарк, 2013; Наймарк, 2009).

Способность реальных разрывов воспринимать нагрузку, реагировать на нее, взаимно конкурировать при разрастании зависит от количества, морфологии, расположения, кинематики множества сочленений и пересечений с другими разноранговыми нарушениями. Из-за этого расположение, ориентации, размеры магистральных разрывов и амплитуды подвижек по ним крайне неустойчивы и невоспроизводимы.

При соотношениях размеров разноранговых объемов  $5 \div 2:1$  и значительном разбросе размеров объемов некоторого одного ранга, надежное отнесение дислокаций к определенному парагенезу практически неосуществимо. К концу даже одного цикла макродеформирования возникает множество трудно рангово-идентифицируемых дислокаций каких угодно размеров, ориентаций и типов смещений. Среди них всегда найдутся формально подходящие под тот или иной эталонный парагенез. О принадлежности структурного ансамбля к «одному циклу», можно говорить только если иметь в виду общее для макрообъема поле напряжений. Его локальные разноранговые возмущения, перестраиваясь во времени и пространстве, меняют условия возникновения каждого нового элемента ансамбля. Совпадения результатов модельного и природного деформирования приблизительны, случайны и крайне неустойчивы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различные аспекты анализируемой проблемы рассматривались давно и многими исследователями. Перечень имен, и, тем более, список хотя бы только основных работ мог бы занять не одну страницу. Аналитический, даже краткий, обзор этого материала ввиду ограниченного объема статьи был невозможен.

При подготовке данной публикации мы неоднократно обращались, помимо работ, указанных в списке литературы, к трудам известных отечественных ученых М.А. Гончарова, П.М. Горяинова, Г.А. Гусева, И.Л. Гуфельда, О.И. Гущенко, А.В. Дещеревского, И.П. Добровольского, Д.Г. Егорова, А.Д. Завьялова, В.Г. Кособокова, А.А. Лукка, А.А. Любушина, А.К. Певнева, В.Е. Панина, Л.М. Расцветаева, В.Н. Родионова, М.В. Родкина, И.А. Сизова, Л.А. Сим, Г.А. Соболева, В.Г. Талицкого, В.И. Уломова, В.И. Уткина, В.М. Цветкова. Были изучены материалы дискуссий: сейсмологов США,



Великобритании, Франции, Италии, Японии, Китая, Дании в журнале «Nature» (1999), отечественных геофизиков и геологов на 33-й Генеральной Ассамблее Европейской сейсмологической комиссии (Москва, 2012), на Третьей Всероссийской тектонофизической конференции (Москва, 2012), на Международном конгрессе «Natural Cataclysms and Global Problems of the Modern Civilization» (Стамбул, 2011). Указанный материал содержит, наряду с большими массивами фактических данных и широкими концептуальными построениями, глубокий анализ возможностей современных методов интерпретации результатов геолого-геофизического и геодезического мониторинга пространственно-временных изменений параметров геологической среды в целях реконструирования прошлых и прогнозирования будущих обстановок и событий.

Наш анализ этого обширного материала, особенно последних лет, подтверждает: представления о самоподобной иерархичности и грубой дискретности геосреды не уточняют или детализируют, а кардинально меняют традиционную модель разрывообразования (Наймак, 2003). В любом реальном массиве число блоков подчиненного ранга невелико, осреднение структурных и динамических характеристик по объему и времени неэффективно. Последовательность разноранговых дизъюнкций существенно хаотична; местоположения, частоты, длительности, амплитуды и знаки отдельных смещений непредсказуемы. Для реконструкции поля напряжений по сколам обязательна их предварительная ранговая разбраковка, а для определения их первичной разрешенности или запрещенности в некотором поле напряжений необходимо знать историю постсдвиговых деформаций на каждом масштабном уровне. При этом ни элементы, грубодискретной фрактальной структуры, ни их ансамбли, в общем случае, заведомо не поддаются надежной ранговой, возрастной и типологической идентификации. Потенциально сейсмогенные макроразрывы осложнены зацепами, трудно различимыми по упрочняющей роли. Из-за неотчетливой выделенности и неустойчивости аномалий-предвестников конкретные крупные сейсмические события непрогнозируемы (Наймак, 1998б; Наймак, Захаров, 2012).

Пределы применимости рассмотренных методов решающим образом определяются чувствительной зависимостью поведения нелинейных неравновесных геодинамических систем от начальных условий и неконтрастной выделенностью литосферных аномалий конкретных рангов.

Сказанное не отрицает реальности ни структурно-динамической подготовки земле-

трясений, ни их предвестников, ни парагенетических структурных ансамблей. Но требуемое практикой точное и надежное распознавание «полезного сигнала» (предвестника конкретного землетрясения, признака конкретного структурного парагенеза и т. п.) среди «помех» разной природы и выраженности – нереально. Хотя прогнозируемых явлений бесконечно много, но ложных тревог, пропусков цели, необоснованных идентификаций в бесконечное число раз больше.

Огромное большинство интересующих нас, не только сложных, но и сравнительно простых процессов, в общем случае не поддается прогнозированию. Их механизм часто таков, что порождает хаотическое поведение, непредсказуемое по своей природе, а не из-за недостаточной изученности или несовершенных методик. Для хаотических систем, траектории которых вначале сколь угодно близки, но со временем экспоненциально расходятся, вероятностные описания необратимы и несводимы к отдельной траектории, а измерения сколь угодно точные не приводят к детерминистическим предсказаниям.

Диалектика процесса научного познания такова, что расширению его возможностей неизбежно сопутствует сужение пределов применимости прежнего знания и введение ограничений на реализуемость нового. Задавая при посредстве науки вопросы природе, мы получаем не только многообещающие позитивные, но нередко и весьма разочаровывающие ответы. Не замечать, игнорировать, безосновательно отрицать их – неразумно; следует признать их и действовать в их рамках, пока не будет выявлена их ошибочность и найдено научное опровержение.

Анализ методических аспектов проявлений фрактальности и нелинейности в геодинамических процессах, конечно, должен быть продолжен. Но и сейчас нет сомнений в том, что динамическая геология оказалась перед фундаментальным концептуальным вызовом, уклониться от которого уже не удастся. Однако найти адекватный ответ на него еще только предстоит.

#### Список литературы

- Баклашов И.В.* Деформирование и разрушение породных массивов. М.: Недра, 1988. 271 с.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Недра, 1975. 536 с.
- Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Структуры и процессы разрушения горных пород // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. М.: ИФЗ РАН, 1993. 192 с.
- Дискретные свойства геофизической среды / Под ред М.А. Садовского. М.: Наука, 1989. 174 с.

- Захаров В.С.* Анализ характеристик самоподобия сейсмичности и систем активных разломов Евразии // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2011. № 6. С. 10-17.
- Короновский Н.В., Наймарк А.А.* Прогноз землетрясений – реальная научная перспектива или вызов науке? // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2009. № 1. С. 12-22.
- Короновский Н.В., Наймарк А.А.* Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2012. № 6. С. 3-10.
- Короновский Н.В., Наймарк А.А.* Структурные парагенезы в дискретной геологической среде // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2013. № 1. С. 3-10.
- Наймарк А.А.* Структурированность геологической среды и корректность реконструкций ее напряженного состояния // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 1995а. № 3. С. 14-21.
- Наймарк А.А.* Физический механизм предразрушения и проблемы унаследованности сейсмогенных тектонических сдвигов // Геология. Прогр. «Университеты России». М.: МГУ. 1995б. Т. 2. С. 7-12.
- Наймарк А.А.* Фрактальность геологической среды и проблема прогнозируемости сейсмогенного макроскальвания // Известия вузов. Геология и разведка. 1997а. № 2. С. 23-31.
- Наймарк А.А.* Какова «истинная» структурированность геологической среды? // Известия вузов. Геология и разведка. 1997б. № 1. С. 3-9.
- Наймарк А.А.* Реверс-каскадная модель процесса разрывообразования и структурные парагенезы // Известия вузов. Геология и разведка. 1998а. № 3. С. 3-9.
- Наймарк А.А.* Физический механизм и проблема прогнозируемости сейсмогенного макроскальвания в структурированной среде (теоретические аспекты) // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 1998б. № 4. С. 20-26.
- Наймарк А.А.* О реконструкции полей тектонических напряжений методом вторичных разрывных нарушений // Известия вузов. Геология и разведка. 1999. № 6. С. 19-26.
- Наймарк А.А.* К теории сейсмогенного макроскальвания // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2001. № 4. С. 3-8.
- Наймарк А.А.* Сценарий возникновения тектонодинамического детерминистского хаоса // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2003. № 5. С. 22-31.
- Наймарк А.А.* Структурированность геологической среды – свойство или состояние? (Проблема, теория, терминология) // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2006. № 2. С. 73-80.
- Наймарк А.А.* Грубодискретная фрактальность геологической среды и проблемы тектонофизического моделирования // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2009. № 5. С. 3-11.
- Наймарк А.А., Захаров В.С.* О соотношениях направленности, цикличности и нелинейности в геологических процессах // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1. Вып. 19. С. 181-190.
- Наймарк А.А., Рябухин А.Г.* Динамическая геология на рубеже двух общенаучных парадигм // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2010. № 6. С. 3-10.
- Николаев А.В.* Черты геофизики XXI века // Проблемы геофизики XXI века. Кн. 1. М.: Наука, 2003. С. 7-16.
- Осокина Д.Н.* Моделирование тектонических полей напряжений, обусловленных разрывами и неоднородностями в земной коре // Экспериментальная тектоника (Методы, результаты, перспективы). М.: Наука, 1989. С. 163-197.
- Ребецкий Ю.Л.* Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений // Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 359-395.
- Садовский М.А.* О естественной кусковатости горных пород // ДАН. 1979. Т. 247. № 4. С. 829-832.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 101 с.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. ГЕОС, 2003. 241 с.
- Шерман С.И.* Деструкция литосферы: разломно-блоковая делимость и ее тектонофизические закономерности // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 4. С. 315-344.
- Bak P., Tang C.* Earthquake as a self-organized critical phenomenon // JGR. 1989. V. 94 (B11). P. 15635-15637. DOI:10.1029/JB094iB11p15635.
- Koronovsky N.V., Naimark A.A.* The forecast of earthquakes today: challenges and answers // Natural Cataclysms and Global Problems of the Modern Civilization. Proceedings of the World Forum – International Congress, Sept. 19-21, 2011, Istanbul, Turkey. London: SWB. P. 166-175.

**METHODS OF DYNAMIC GEOLOGY ON CRITICAL BORDER OF APPLICABILITY**

**N.V. Koronovsky, A.A. Naimark**

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, 119991*

Theoretical bases of traditional methods of geodynamic reconstruction and forecasting are analysed in a view of concepts of fractal structures and nonlinearity of evolution of the geological medium. It is shown, that limits of their scientific-practical applicability are decisively defined by sensitive dependence of behaviour of nonlinear nonequilibrium geodynamic systems on initial conditions and low-contrast specificity of lithospheric anomalies of different ranks. Dynamics of discussed processes of rupturing and seismicity is essentially chaotic and unpredictable; this is consequence of their nature, but not of an insufficient level of researches. Processes of formation of paragenetic structural ensembles and anomalous concentrations of tectonic stresses, structurally-dynamic preparation and precursors of earthquakes are real. But for chaotic geosystems with exponential divergence of initially close ways of evolution, descriptions by probabilities are not reduced to the average trajectory, and the most exact dimensions do not lead to deterministic predictions of geocataclysms. Theoretical bases and methods of dynamic geology demand fundamental updating.

*Keywords: dynamic geology, methods, geomedium, nonlinearity, fractality, faults, stress.*