

А. С. Костинский

Эволюция диссипативной структуры как модель процесса в очаге землетрясения: аналогии в живых системах и химической кинетике

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

Высказывается предположение, что возникновение, эволюция и распад диссипативной структуры, подобной гексагональным ячейкам Бенара, в среде или субстанции с нелинейными свойствами, может оказаться причиной явления, воспринимаемого как очаг землетрясения. Утверждается, что эффективное описание явления осуществимо только в терминах аксиоматически построенной механики возбудимых сред, как вариант “встроенной” в схему классических кинематических очаговых моделей. Тезис проиллюстрирован сопоставлением с многообразием автоволновых процессов в биологических и химических системах.

Две ключевые позиции, две мысленные “опорные точки” должны быть выделены, когда речь идет о механике сплошных сред в существующем описании очага землетрясения. Во-первых, источник понятий и образов, связанных с сейсмическими явлениями, есть “материнские гены” полевой геологии плюс вера в то, что в глубинах Земли возможно нечто аналогичное, происходящему на поверхности. Во-вторых, “архетип” сейсмических катастроф породил представление о том, что землетрясение неизбежно связано с разрушением, *распадом* некоторой невидимой структуры. Когда видим рушащиеся здания и трещины, разрывающие землю, трудно увидеть за всем этим *образование* структуры. Но век классической традиции закончился, когда окружающий мир воспринимался как совокупность наблюдаемых объектов, движущихся под действием сил согласно определенным законам. Стало понятно (еще на заре квантовой механики), что природа действует иначе.

Очевидность физических теорий квантового, релятивистского мира есть согласованность постулатов, а о базовых понятиях принципиально невозможно составить наглядного представления, не впадая в противоречие. Решающая роль здесь принадлежит математике фундаментальных принципов, принимаемых как данность, группам преобразований и их инвариантам. То, что мы наблюдаем, есть некоторые из инвариантов в определенной системе отсчета, вектора состояния физической системы (в широком смысле, т. е. величины, полностью характеризующие систему) не обязательно совпадают с “наблюдаемыми”. Это еще один камень в фундаменте современного физического описания, и сейсмологические модели не должны быть исключением.

Поразительный пример в истории физики служит опорой в подобном стремлении. Именно осознание заряда и массы как свойств вещества исторически приходило постепенно из рутины повседневных наблюдений над взаимодействием тел, а пространственные интервалы и координаты точек, хотя и входили на равных в законы Ньютона и Кулона, все же воспринимались как составляющие иной сущности, геометрии мира. Риман различал геометрическое пространство и физическое пространство, подобное субстанции, “ответственное” за распространение тяготения и света, и допускал, что метрическая сторона геометрии,

возможно, теряет привычный смысл в бесконечно малом. По Вейлю, может порождаться, пусть в малом, и сложная топология, полностью отличная от топологии евклидова пространства. Но даже просто замкнутость в целом, хотя бы по одному из измерений, приводит к “геометродинамическим” эффектам, заставляющим предположить не пассивную, но “творящую” роль пустого пространства.

Вообразим, например, искривленный мир, топологически эквивалентный трехмерной сфере, состоящий из двух полостей, соединенных узким тоннелем (“песочные часы”). Как один из вариантов физической аксиоматики допустим, что в таком мире справедливы уравнения Максвелла. Переменное во времени свободное электромагнитное поле порождает поток силовых линий, исходящий из горловины тоннеля, дивергенция поля всюду равна нулю. Силовые линии нигде не кончаются, но наблюдатель, не располагающий микроскопом с достаточным увеличением, считающий горловину тоннеля обычной точкой своего пространства, увидит в этой точке обрыв силовых линий, т. е. элементарный электрический заряд. Этот *заряд без заряда* — динамический, он меняется и может исчезнуть для наблюдателя, “обитающего” в одной из полостей, если петли силовых линий уйдут через горловину в соседнюю полость. В пространстве с многосвязной топологией силовые линии, заключенные в ручки, не могут уменьшиться в числе, поток из горловины ручки не меняется со временем, и гипотетический наблюдатель отметит неизменность константы движения, воображаемого, но реально не существующего заряда [1]. Если искать аналогии, может быть, подобная “абберация зрения” существует и в восприятии сейсмологических конструкций?

История представлений о происходящем в очаге землетрясения, если принять за начало отсчета теорию упругой отдачи Рейда, насчитывает век. К настоящему моменту можно, взглянув как бы извне, представить себе нечто целое, мир, *универсум* очаговых моделей просто как множество элементов, или абстрактных точек (не в геометрическом смысле). Подобная отстраненность неизбежно предшествует изменению языка, в согласии с тем, что постепенно неумовимо меняется характерный масштаб, наша обиходная, повседневная позиция в мысленном пространстве-времени, в котором продолжается существование моделей, хотя их эволюция кажется завершенной.

Явно можно выделить некий центр, образ распространяющейся круговой трещины сдвига, и “нефизическое” решение самоподобной задачи [2]

$$\Delta U^s(\rho, t) = \Delta V \sqrt{t^2 - \left(\frac{\rho}{\nu}\right)^2} H\left(t - \frac{\rho}{\nu}\right), \quad \Delta V, \nu = \text{const}, \quad (1)$$

бесконечно возрастающее со временем. Если (1) принимать как исходную точку в воображаемом пространстве логики моделирования, ткань сопутствующей топологии включает в себе “окрестность”, модели, полученные усовершенствованием (1), “обрезанием” процесса в пространстве и времени [3, 4]. Но если мы тем или иным образом меняем (1), то неявно подразумевается, может быть принципиальное, изменение природы физического объекта, который таким образом описывается. Это уже не только не будет круговая распространяющаяся трещина сдвига, но, не исключено, реальность, от нее произвольно далекая. Но что же это?

Зададимся вопросом: если спорна возможность использовать теорию упругости как базу описания очаговых процессов, то что можно считать бесспорным? Только одно, представление об очаге как о нелинейной распределенной открытой системе, далекой от термодинамического равновесия. Само по себе это не ново и мало что дает. Перерезав “пугови-

ну”, связывающую с повседневным опытом, мы вынуждены будем допустить, что очагом землетрясения, т.е. источником волн, приходящих в точку наблюдения, может быть любая меняющаяся во времени особенность поля любой характеристики среды. “Особенность” означает наш уровень описания, с точки зрения физики точечных или распределенных на плоскостях сущностей с самого начала нет.

Следующий шаг, конечно, должен заключаться в признании, что особенности может не быть и в описании, вполне допустимо представить себе возникающую и затем исчезающую более или менее отчетливо локализованную область, которая, до того как исчезнуть, успевает послать в среду импульс резкого изменения, хронику своей самоорганизации. Способное к самоорганизации “нечто” нельзя уже назвать просто средой, в традиционной постановке вопроса среда должна содержать сейсмический источник, принципиально с ней не сходный. Среда, или субстанция, теперь в некотором смысле однородна и означает не более как одну из возможных, интуитивно определяемых, лишенных отчетливости, последовательных стадий эволюции, что-то напоминающее период спокойного Солнца. Это “нулевая конфигурация”, и тогда “очаг землетрясения” по определению есть ее возмущение. “Земной” опыт в любом случае остается первоосновой, но все же следует быть готовым к тому, что описание происходящего в субстанции принципиально невозможно как экстраполяция явлений на поверхности. Тогда остается не подлежащим сомнению только сам факт появления возмущения “нулевой конфигурации”, способность субстанции генерировать и распространять *возбуждение*, т.е. состояние, дополнительное по отношению к основному состоянию.

В биологии и химии привычна ситуация, когда кооперативное поведение систем, различных по своей природе, сходно. Железная проволока в стеклянной трубке, заполненной азотной кислотой, обнаруживает свойства, напоминающие свойства нервных волокон: если в каком-то месте зачистить проволоку, убрав пленку окисла, царапина “побежит” вдоль проволоки с некоторой постоянной скоростью [5]. Другой пример: две ячейки, заполненные электролитом разной концентрации и разделенные мембраной из пористого стекла, это устройство известно как мембранный осциллятор Теорелла. С помощью внешних электродов пропускается постоянный ток, при больших токах возникают периодические колебания мембранного потенциала и сдвинутые по фазе колебания уровня жидкости, система переходит в режим возбуждения, подобно биологическому объекту.

Если отвлечься от конкретной природы системы, можно ли определить общее в этих и других похожих явлениях? Очевидно, общее здесь — способность к генерации и распространению возбуждения, дополнительного (по отношению к основному) состояния. Если мы оставляем это свойство единственно характерным для системы, то мы описываем происходящее на высшей степени абстракции, как эволюцию возбудимой среды [6].

Не универсальный, но один из мыслимых механизмов очага представляется в таком случае как самоорганизация возбудимой среды слоя, самопроизвольное возникновение и эволюция устойчивой в течение некоторого времени регулярной структуры. Если рассматривать слой как нелинейную, открытую, далекую от термодинамического равновесия систему с распределенными параметрами, не кажутся странными конвективные решетки, подобные шестигранным ячейкам Бенара, автономные локализованные источники волн или распространение уединенного фронта возбуждения. Мир автоволновых явлений велик, и трудно избавиться от ощущения: именно этой “ткани” так не хватает “остову” кинематических моделей (табл. 1).

Теперь логичен вопрос: если так, то классические очаговые модели [3, 4] чужеродны подобному взгляду на вещи, безнадежно отбрасываются и надо начинать “с чистого листа”,

или все же нечто в основе своей, пусть на время, останется и есть смысл, пусть в рамках половинчатых, непоследовательных теорий, взглянуть с других точек зрения?

Мы записываем, например, разложение вектора скачка смещения $[\mathbf{U}(\dots)]$ в произвольной точке плоской площадки разрыва Σ —

$$[\mathbf{U}(\dots)] = \mathbf{n}([\mathbf{U}(\dots)]\mathbf{n}) + \mathbf{n} \times (\mathbf{n} \times [\mathbf{U}(\dots)]),$$

Таблица 1. “Несущие конструкции” структуры кинематических очаговых моделей и “мозаичный узор” автономных динамических режимов

Сейсмология	Химия, биология, биофизика
Зарождение “с нуля” сейсмического источника в виде плоской области или площадки разрыва: меняющийся во времени, непрерывно распределенный вектор скачка смещения, или трещина сдвига, нечто не существовавшее ранее даже в зародыше появляется в произвольной невыделенной точке однородной изотропной упругой среды	Генерация химических волн точечным источником: пейсмейкер, ведущий центр, “эмиттер” спиральной волновой структуры (ротатор) возникает как “диффузионная неустойчивость” в параметрически однородной среде, локальная неоднородность (“гетерогенный центр”), реагирующая или каталитическая частица, просто особые граничные условия [7]
Прямоугольная площадка разрыва, один из размеров которой гораздо больше другого, однонаправленное распространение процесса в модели Хаскелла [8]	Бегущий фронт возбуждения в аксоне кальмара, в волокне скелетных мышц, динамика автоколебательной реакции окисления в длинных трубках [9]
Видение и описание сейсмического источника как равноразмерного, равнонаправленного: разрыв растет радиально во всех направлениях на плоскости, произвольным образом ориентированной в среде [3, 4]	Картина “стрелковой мишени”: ситуация на территории, которая поражается эпидемией, исходящей из постоянного очага инфекции, поле агрегирующих амёб, которые собираются к клетке, выделяющей АМФ, активность эктопического фокуса сердца, волны потенциала действия, нарушающие нормальный ритм сердечных сокращений в ситуациях сбоя в функционировании синусного узла
Расширение эллиптической трещины, сохраняющей форму неизменной, как модель переменного во времени и пространстве скачка смещения [2, 4]	Концентрические кольцевые волны в химических системах [10]
Модель кругового разрыва, дополненная аппроксимацией релаксационного источника: скольжение в точке останавливается информацией от краев разрыва, фронт процесса, залечивающего разрушение, движется внутрь области после того, как разрастание наружу прекращается [11]	Пейсмейкерная активность агрегирующих амёб: начальный импульс запускает окружающее кольцо, волна от которого сходится опять к центру, и запускает его снова, процесс продолжается [12], заторможенная кинетика в анестезированном сегменте нервного волокна: “тлеющая” область может вызвать возбуждение в направлении, обратном тому, откуда пришло исходное [13]
Различные варианты описания остановки распространяющегося разрыва [3, 4]	Различные ситуации, обнаруживающие эффект ингибированной возбудимости: химически инертный наполнитель, слишком резкий переход, чувствительное к температуре критическое отношение диаметров в местах разветвления нервных волокон, возбуждение не преодолевает порог самоподдерживающегося распространения, импульс затухает [14], переменный диаметр канала распространения, приходящий импульс не затухает полностью, но может замедлиться и остановиться, тлея “в нерешительности” [15]

единичная нормаль $\mathbf{n}$ постоянна по направлению. Фактически то, моделью чего является площадка, есть “сэндвич” из двух слоев “элементарных” частиц, или физически бесконечно малых объемов среды, иначе скачок смещения в этой области представить невозможно. Предположив, что реален именно “сэндвич”, а не мысленный разрез среды, сместившись таким образом к абстрактной, но физической архитектуре, мы оказываемся в начале по необходимости долгого пути, этот путь заключается в постепенном изменении, “перерождении” ткани привычного, наглядного кинематического моделирования.

Как вариант, даже не “сэндвич”, а физически бесконечно тонкий слой некоей субстанции, вложенный в “среду–термостат”, глобально не меняющую характеристик, пройдя через “призму” обыденного восприятия, “перевосплощается” в образ внутренней поверхности с распределенным, зависящим от времени скачком смещения. Описание такого слоя–источника обычным путем, “со стороны вещества”, т.е. конструирование уравнений состояния слоя и “среды–термостата”, с последующим совмещением через подходящие граничные условия, с самого начала кажется бесперспективным. Проблема не в том, что материя слоя недоступна для непосредственного исследования. В конце концов о верхней мантии и астеносфере известно достаточно много, и вполне допустима вероятность влияния тектоники плит только через граничные условия для приблизительно однородной по своим свойствам зоны. Но исходная принципиальная открытость и нелинейность системы делают бесконечным набор возможностей, приводящих к возмущению “нулевой конфигурации” слоя. Фактически остается способность генерировать и передавать возмущение или, иначе, *возбуждение*, состояние, дополнительное по отношению к основному состоянию, как единственное не подлежащее сомнению свойство вещества слоя.

Сложность состоит еще и в том, что “строительные блоки” кинематических моделей настолько хорошо согласованы, так тщательно пригнаны друг к другу, что радикально изменить один из них, не трогая остальные, невозможно. Немыслимо, например, наделить толщиной поверхность, в точках которой терпит скачок смещение, до тех пор, пока речь идет в строгом смысле слова о скачке смещения. Неизбежен поэтому этап “непоследовательных” моделей, для которых основные соотношения кинематики сейсмических источников формально останутся без изменения, но понимание их станет другим. Более того, ответ на вопрос, что считать пониманием, должен стать другим, следуя общей тенденции, так же как аксиоматика и согласованность постулатов в квантовом, релятивистском мире заменили ньютоновские “атомы”, составляющие “вещество” классических физических теорий.

Таким образом, заранее исключив возможность каких-либо наглядных представлений, мы оказываемся в ситуации, когда выбора, по сути, нет, в нашем распоряжении остается только аксиоматика как метод и принципы, универсальность которых не вызывает сомнения, даже если доказательств этой универсальности не существует. Аналогии, примеры “восхождения” к абстракции возбудимых сред в сопредельных областях знания здесь, несомненно, важны, как немногие возможные ориентиры на этом пути. Собрать воедино пусть не всеобъемлющую, но достаточно разнообразную коллекцию таких аналогий, поставить рядом с возникшими совершенно независимо мысленными образами кинематического очагового моделирования, в этом видится цель настоящей заметки.

1. Мизнер Ч., Уилер Дж. Классическая физика как геометрия // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – Сб. статей. – Москва: Мир, 1979. – С. 542–554.
2. Burridge R., Willis J. The self-similar problem of the expanding elliptical crack in an anisotropic solid // Proc. Cambr. Phil. Soc. – 1969. – 66. – P. 443–468.

3. *Sato T., Hirasawa T.* Body wave spectra from propagating shear crack // *J. Phys. Earth.* – 1973. – **21**. – P. 415–431.
4. *Dahlen F. A.* On the ratio of P-wave to S-wave corner frequencies for shallow earthquake sources // *Bull. Seism. Soc. Amer.* – 1974. – **64**. – P. 1159–1180.
5. *Волькенштейн М. В.* Биофизика. – Москва: Наука, 1988. – 591 с.
6. *Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С.* Математическая биофизика. – Москва: Наука, 1984. – 304 с.
7. *Филд Р., Бургер М.* Колебания и бегущие волны в химических системах / Пер. с англ. – Москва: Мир, 1988. – 720 с.
8. *Haskell N. A.* Elastic displacements in the near-field of a propagating fault // *Bull. Seism. Soc. Amer.* – 1969. – **59**. – P. 865–908.
9. *Жаботинский А. М.* Концентрационные автоколебания. – Москва: Наука, 1974. – 178 с.
10. *Orbán M.* Chemical oscillation during the uncatalyzed reaction of aromatic compounds with bromates. 4. Stationary and moving structures in uncatalyzed oscillatory chemical reactions // *J. Am. Chem. Soc.* – 1980. – **102**, No 13. – P. 4311–4314.
11. *Molnar P., Tucker B. E., Brune J. N.* Corner frequencies of P- and S-waves and models of earthquake sources // *Bull. Seism. Soc. Amer.* – 1973. – **63**. – P. 2091. – 2104.
12. *Pate E. F., Odell G. M.* A computer simulation of chemical signaling during the aggregation phase of *Dictyostelium discoideum* // *J. Theor. Biol.* – 1981. – **88**, No 2. – P. 201–208.
13. *Antzelevitch C., Jalife J., Moe G. K.* Characteristics of reflection as a mechanism of reentrant arrhythmias and its relationship to parasystole // *Circulation.* – 1980. – **61**, No 1. – P. 182–191.
14. *Westerfield M., Joyner R. W., Moore J. W.* Temperature-sensitive conduction failure at axon branch points // *J. Neurophysiol.* – 1978. – **41**, No 1. – P. 1–8.
15. *Joyner R. W., Westerfield M., Moore J. W.* Effects of cellular geometry on current flow during a propagated action potential // *Biophys. J.* – 1980. – **31**, No 2. – P. 183–194.

Отдел сейсмологии Института геофизики
им. С. И. Субботина НАН Украины, Симферополь

Поступило в редакцию 09.09.2013

О. С. Костінський

Еволюція дисипативної структури як модель процесу в осередку землетрусу: аналогії в живих системах і хімічній кінетиці

Висловлюється припущення, що виникнення, еволюція і розпад дисипативної структури, подібної гексагональним коміркам Бенара, в середовищі або субстанції з нелінійними властивостями, може виявитися причиною явища, що сприймається як осередок землетрусу. Стверджується, що ефективний опис явища здійснений тільки в термінах аксіоматично побудованої механіки збудливих середовищ, як варіант “вбудованої” в схему класичних кінематичних осередкових моделей. Теза проілюстрована зіставленням з різноманітним автохвильовим процесів у біологічних і хімічних системах.

A. S. Kostinsky

Evolution of a dissipative structure as a model of the process in an earthquake focus: analogies in living systems and chemical kinetics

The assumption is made that the emergence, evolution, and decay of a dissipative structure similar to hexagonal Benard cells in a media or a substance with nonlinear properties may cause a phenomenon perceived as the earthquake focus. It is asserted that an effective description of the phenomenon is only feasible in terms of axiomatically built mechanics of excitable media, as an option of the classical kinematic focus models “embedded” in the scheme. The thesis is illustrated by the juxtaposition with a variety of autowave processes in biological and chemical systems.