

---

## КУМУЛЯТИВНО-ДИССИПАТИВНОЕ РАСШИРЕНИЕ СИНЕРГЕТИКИ

О.П. Иванов, М.А. Винник

Музей землеведения МГУ им. М.В. Ломоносова  
*Ленинские горы, ГСП-1, Москва, Россия, 119991*

Синергетика возникла на базе достижений теории неравновесной термодинамики, теории нелинейных колебаний и автоволн, а также теории когерентных (лазерных) излучений. Ее основу составили теория возникновения диссипативных структур в химически и термодинамически неравновесных средах, а также принципы описания иерархических переходов в соответствии с параметрами порядка. В дальнейшем она была дополнена результатами математического моделирования эффектов инерции тепла и локализации термодинамических процессов на базе уравнений теплопроводности для класса моделей типа реакция—диффузия, а также разработкой сценариев перехода к хаосу. В рамках синергетики получили успешное развитие и практические приложения различные модификации теории самоорганизованной критичности, методы фрактального анализа, анализа фликкер-шума и др. В настоящее время синергетика успешно расширяет поле своих приложений, включая нейродинамику мозга, проблемы самоорганизации геологических и социальных систем, эволюции демографических систем и многое другое.

Важно подчеркнуть, что большая часть результатов получена для процессов и состояний с малыми плотностями энергий и слабыми потоками энергии. В то же время процессы вселенского и планетарного масштаба представлены, в основном, экстремальными состояниями и высокими плотностями энергии. По мнению академика Фортова В.Е., 98% вещества и энергии Вселенной находятся в экстремальных состояниях, чаще всего плазменных. Следовательно, синергетика как теория самоорганизации пока еще не обладает достаточной полнотой в описании всего класса диссипативных процессов. Более того, до сих пор не уделяется должного внимания специфике получения системами внешней энергии для поддержания неравновесных состояний и обеспечения диссипации. Со времен Шредингера все скрыто под покровом негэнтропии. В реальности же взаимодействие систем осуществляется в конкретных спектрах обмена энергией. Это справедливо и для живых, и для косных систем. Например, звезды давно классифицируются по спектрам излучения, икра рыб разного возраста обладает разными спектрами биоизлучения, которые могут быть и полезными, и вредными при воздействии на аналогичные образования, аура каждого человека индивидуальна, давно установлена возможность гипнотического воздействия и даже зомбирования и т.д.

Процессы с высокой плотностью энергии не могут описываться с позиций теории диффузии, результаты будут заведомо неадекватны реалиям. Здесь тре-

буются иные подходы, опирающиеся на теорию конвекции, амбиполярного дрейфа, турбулентности, вихревых процессов, конвективной кумуляции энергомассовоимпульсных потоков, которые соответствуют высоким скоростям протекания процессов. Такие процессы удобно называть кумулятивными. В отличие от аккумуляции, что соответствует простому (линейному) накоплению (куча песка, вклад в сберкассу и т.д.), кумуляция предполагает концентрацию энергии, вещества, информации по нелинейным законам. В этом случае мы уже имеем дело с процессами, заключенными в определенные формы или структуры, соответствующие степени кумулятивности (нелинейному уплотнению).

Не требуется большой фантазии, чтобы представить себе, сколь обширен мир кумулятивно-диссипативных образований. Например, джеты галактик, пульсары, квазары; конвекция, спиккулы и протуберанцы на Солнце; молнии, землетрясения, вулканы, циклоны, торнадо, смерчи, склоновые процессы и многое другое на Земле. В лабораториях в практических целях уже ведутся массовые и весьма успешные исследования по созданию и удержанию высоких плотностей энергии. Если дополнить класс диссипативных процессов подклассом кумулятивно-диссипативных, то можно построить эволюционный ряд механизмов диссипации и соответствующих им структур, сменяющих друг друга по степени сложности и по мере роста плотности энергии диссипации. Когда этот ряд будет заполнен теоретическими и экспериментальными результатами, возникнет обширнейшее поле приложений синергетики.

Начинает такой ряд обыкновенная тепловая диссипация с поверхности системы за счет теплопроводности или диффузия в химических средах. Она охватывает всю поверхность системы (или фронт диффузии). По мере роста плотности энергии диссипации механизм простого теплопереноса или интегральной диффузии не обеспечивает эффективный отток энергии. На смену ему приходят механизмы структурированной конвекции, работающие при более высоком градиенте температур или концентраций вещества. В этом случае эффективность или темп переноса целиком определяется скоростью обращения потока в конвективных структурах, квантованными размерами этих структур и степенью модификации самого потока. Вне всякого сомнения, существуют пороговые параметры, например величина вязкости среды, дефицит обмена, которые ограничивают возможности конвективного механизма энергопереноса. И тогда происходит переход к более высокоскоростному механизму переноса (динамический фазовый переход), например к турбулентности и, далее, к вихревым структурам обычного или концентрированного типа.

Однако когда мы переходим к экстремальным плотностям энергии, то эти механизмы уже не могут обеспечить сохранность системы, переполненной энергией. Она должна либо взорваться, либо обеспечить дополнительные и притом весьма мощные стоки энергии. В качестве таковых и выступают кумулятивные или струйные выбросы энергии, обеспечивающие высококонцентрированные стоки энергии с гиперзвуковыми скоростями из отдельных участков системы, т.е. происходит переход к дискретной высокоэнергетичной форме диссипации. Еще более эффективен дискретизированный струйный выброс, как это происходит

в ситуациях с четочными и шаровыми молниями, а также с концентрированными локальными вихрями. И, наконец, взрыв системы — это механизм мгновенной диссипации, так как одномоментно происходит выброс большей части накопленной внешней и внутренней энергии системы и разрушение исходной системы, например вспышка сверхновой.

Высочайшую эффективность кумулятивно-диссипативного переноса энергии демонстрируют молнии. Благодаря проводимости воздуха в обычном состоянии к земной поверхности **на площади около 80 км<sup>2</sup>** каждую секунду от облака поступает ток до 1 ампера. В то же время ток молнии диаметром всего  $2 \cdot 10^{-9}$  км<sup>2</sup> (диаметр 5 см) в течение долей секунды достигает 500 кА. То есть эффективность переноса энергии молнией в среднем в  $2 \cdot 10^{16}$  раз выше. Естественно, что такие кумулятивные образования на поверхности системы — явление дискретное, в противном случае — это взрыв и катастрофа всей системы.

Исследования таких процессов и структур с неизбежностью приводит к необходимости отказа от главенствующей роли термодинамических моделей. Здесь на первый план выходит электродинамика. Именно электромагнитные поля обеспечивают схлопывание высокоэнергетичных потоков в узкие кумулятивные струи. Например, сейчас уже не вызывают удивления утверждения об электромагнитной природе циклонов, торнадо и смерчей. Конвекция на Солнце осуществляется не по сценарию Релея-Бенара, а по термоэлектрическому варианту с существенным кумулятивным эффектом (спикулы, протуберанцы, электромагнитные структуры и пятна). Землетрясения на Земле стимулируются и сопровождаются электромагнитными явлениями [3; 5]. Переход к глубокому исследованию диссипативных структур с неизбежностью предполагает сочетание термодинамики и новых подходов описания процессов кумуляции под воздействием электромагнитных полей.

К настоящему времени кумулятивные процессы исследованы в физике плазмы, в гидродинамике, космологии и теории опасных природных процессов. Выполнены теоретические и экспериментальные работы по самофокусировке электрических полей, потоков ионов и электронов в плазменных структурах газового разряда. Показано, что неограниченный рост или кумуляция напряженности электрического поля к центру или некоторой оси фокусирующей системы могут быть описаны в рамках модели амбиполярной дрейф-ионизации. В теоретических работах доказано, что такое формирование в плазме сопровождается взрывным ростом приведенной внешней электрической силы (параметра  $E/N$ , где  $E$  — напряженность электрического поля,  $N$  — плотность среды) к центру фокусирующей энергомассовые потоки системы [1; 2].

Явления, определяемые фокусировкой энергомассовых потоков, в гравитационном поле осуществляются в космосе (в областях нейтронных звезд, пульсаров, квазаров, новых и сверхновых звезд, окружающих их туманностях). Свойством фокусировать массу и схлопывать энергомассовые потоки к центру фокусировки на всех уровнях иерархии диссипативных систем обладают различные природные процессы. Например, фокусировка потоков происходит при столкно-

вении систем теплых и холодных воздушных масс с последующим образованием циклонов, в процессе окклюзии [5]. Аналогия прослеживается при формировании шквалов, смерчей, торнадо, циклонов. Учет фокусировки или кумуляции энерго-массовых потоков — это принципиально новый взгляд на природу опасных природных процессов. В этих структурах из-за кумуляции наиболее эффективно сближаются параметры в направлении градиента энергетического перепада и тем самым минимизируются энергозатраты на перенос энергомассовых потоков. В процессе минимизации энергозатрат происходит формирование кумулятивных струй.

Кумуляцию реальных сил и потенциальных полей можно представить в виде:  $\nabla U_q(r) = F_q \sim 1/r^{\beta}$ , где  $U_q(r)$  — обобщенный потенциал. Аналогичным образом кумулируют и вихревые или нецентральные силы. Для точечных, или сводящихся к точечным, гравитационных и кулоновских аттракторов зависимость приведенной силы от расстояния до аттрактора можно записать в виде:

$$-\nabla U_q(r) = F_q(r) = -\mathbf{r}/r^3 \sim 1/S(r), \quad (1)$$

где  $S(r)$  — площадь сферы, окружающей аттрактор, на которой расположена выбранный точка  $r$ . В ней со стороны притягателя действует приведенная обобщенная сила  $F_q(r) \sim 1/S(r)$ . В случае гравитационного, электрического или даже магнитного полей вместо вектора  $\mathbf{r}$  следует использовать векторные произведения токовых элементов [1].

Из (1) следует, что с уменьшением  $r$  увеличивается приведенная сила  $F_q(r)$  или напряженность поля, т.е. в зоне притяжения происходит фокусировка (кумуляция) приведенной силы и напряженности приведенного поля. Наиболее эффективны сферические или конические формы кумуляции, но реальное эффективное продвижение диссипативных структур возможно только в режиме цилиндрической вихревой кумуляции при формировании кумулятивно-реактивной струи.

Из эксперимента следует, что при распространении молнии или трещины в металле в широком диапазоне параметров происходит формирование нормальной структуры линейной диссипативной, регулярной системы, воспроизводящей и определяющей форму трещины или элемента молнии и скорость их роста. На основе экспериментальных наблюдений [2] сформулированы аналитические модели, описывающие лавинообразное развитие молний и трещин в твердых телах. В соответствии с этими моделями скорость роста столба молнии или трещины при фазовом переходе, в зависимости от времени, определяется соотношением:

$$L(t) = L_0 \exp(t/\tau),$$

где  $\tau$  — постоянная времени, определяемая энергией, идущей на формирование единицы длины обобщенной трещины или элемента молнии.

Если возможно формирование ступенчатых процессов, приводящих к фазовому переходу от среды однородной к среде с трещинами или полостью, то процесс формирования обобщенной трещины приобретает гиперболические временные и пространственные профили параметров, что соответствует гипер-

большому росту или взрыву. Разрушение металлических конструкций (под воздействием обобщенной силы) со временем происходит вначале по экспоненциальному или гиперболическому закону, если не возбуждаются новые степени свободы, противодействующие неограниченной кумуляции энергомассовых потоков и их фазовому переходу в энергию развивающейся регулярной диссипативной системы [1]. Скорости продольного распространения обобщенной трещины и, например, скорость кумулирующего звука или ударной волны, поставляющей энергию для фазового перехода в условиях непрерывного распространения, связаны условием  $r/L$  кумуляции ( $V_L = c_s L/r$ , где  $c_s$  — скорость звука или ударной волны) и могут значительно превосходить скорость звука. Экспериментально такие гиперскорости продвижения обобщенных трещин обнаружены в металлах. В случае землетрясения также могут возникать гиперскорости разломообразования, как это было при суматранском цунамигенном землетрясении 2004 года. Разломная зона длиной 1 300 км возникла за восемь минут [4], тогда как при обыкновенном землетрясении (до 7 баллов по шкале Рихтера) длительность процесса не превышает одной минуты.

Еще одна особенность состоит в следующем. В классических моделях синергетики, основанных на взаимодействии процессов диффузии и нелинейных реакций, происходящих с концентрациями взаимодействующих химических элементов сплошной среды, при численном или аналитическом моделировании получаются диффузионные или бесселевские профили концентраций (Тьюринг, 1952 г., Брюсселятор И. Пригожина и др.). Форма и тип упорядоченности структур могут изменяться в зависимости от значений основных параметров. Подход, развитый в физике плазмы для кумулятивных структур, включает нелинейные процессы конвективного переноса (для плазмы амбиполярного дрейфа) и нелинейные реакции элементов. В рамках этой модели получаются взрывные профили параметров конвективных энергомассовых потоков, схлопывающихся к центру кумуляции [1]. В этой модели предполагается, что центр кумуляции работает как точечный или цилиндрический аттрактор по отношению к конвективным фокусирующимся потокам. Потоки фокусируются к центру в результате кумуляции в активизированной сплошной среде самой внешней силы, проникающей самосогласованно в структуру. В такой постановке можно описать генерацию сил поверхностного динамического натяжения и даже объемного динамического притяжения активизированных частиц среды к центру кумуляции. В центре кумуляции в плазме может происходить ряд процессов, например, формирование пучков с высокой плотностью энергии, возбуждение новых степеней свободы и различная модификация, трансформация или даже трансмутация энергомассовых потоков с возбуждением новых степеней свободы. Профили концентраций элементов плазмы в таких фокусирующихся управляются формированием самосогласованных профилей напряженности глобального электрического поля.

Наличие в плазме амбиполярного, фокусирующего дрейфа открывает еще одну широкую область простого моделирования явлений в плазме. Это область

кумулятивных амбиполярных явлений в газоразрядной плазме. Схлопывание плазменного цилиндра амбиполярным дрейфом может объяснить ряд явлений в формировании у молний и дуг периферии, фокусирующей электроны, энергия которых в таунсендовской плазме значительно превышает энергию ионов. Здесь также присутствует кулоновская самофокусировка потоков электронов, так как есть кулоновские силы. Такая кумуляция проявляет себя в формировании диссипативных структур с дальним динамическим порядком и их диссипативных «кристаллов» — регулярных систем из диссипативных структур, в которых происходит кумуляция электрического поля.

Однако делать акцент только на кумулятивных процессах, обладающих высокими плотностями энергии, было бы неправильным в принципе. Процессы кумуляции справедливы и при слабых энергиях, но сущность их при этом не меняется. Действительно, внезапно возникшая новая мысль — разве это не явление концентрации и особого конструирования имеющейся у нас информации? Все гениальные открытия и творения искусства — разве это не процесс кумуляции творческой энергии? Кумулятивные процессы практически вездесущи. Очень часто таким процессам соответствуют режимы с обострениями со степенными законами развития. Благодаря таким процессам, а не статистическим, было возможно возникновение и развитие жизни на Земле в кратчайшие сроки [6; 7].

Крайне важным является еще одно утверждение о том, что все кумулятивно-диссипативные процессы возникают лишь при взаимодействии открытых сложных систем. Только в этом случае реализуется возможность аккумулировать внешнюю энергию любой системой, входить в неравновесные состояния параметрически или объемно и диссипировать кумулятивно. Свойствами воздействовать друг на друга дистантно обладает, как показано в опытах А.Б. Бурлакова, даже икра вьюна, рыб и др., будучи разного возраста и расположенная на определенных расстояниях. Это же относится и к явлениям гипноза и т.д.

Основное свойство кумулятивно-диссипативных структур заключается в том, что мы видим две стрелы времени: и диссипацию, и кумуляцию. И видим их одновременно. Одна стрела направлена на фокусировку энергии — кумуляцию, вторая — на ее истечение — диссипацию. Кумуляция сопровождается возбуждением новых степеней свободы и новых свойств как у элементов, так и у самих структур.

Таким образом, дополнение исследованной части класса диссипативных структур подклассом кумулятивно-диссипативных процессов позволяет охватить гораздо большее число природных явлений и сделать важный вывод о том, что эволюция живой и неживой природы идет по подобным сценариям, суть которых состоит в избирательном кумулятивно-диссипативном обмене энергией. Избирательный обмен энергией — это то необходимое, которое позволяет конструировать все более сложные структуры для целей адаптации к вариабельности окружающей среды. Сущность такого обмена предстает перед нами как диалектическое единство противоположностей, движущее процесс эволюции.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Высикайло Ф.И.* Процессы амбиполярного переноса в формировании неоднородных профилей в структурах в газоразрядной плазме. Диссертация на соискание ученой степени д-ра ф.-м. н. — Троицк М.О.: ТРИНИТИ, 2003.
- [2] *Высикайло Ф.И.* Кумуляция электрического поля в диссипативных структурах в газоразрядной плазме // *ЖЭТФ*. — 2004. — Т. 125. — № 5. — С. 1071—1081.
- [3] *Высикайло Ф.И., Иванов О.П.* Гипотеза о роли кумулятивных свойств диссипативных структур (аттракторов) в экстремальных явлениях природы // «Синергетика. Труды семинара». Материалы конференции «Самоорганизация и синергетика». — М.: МГУ. — 2006. — № 8. — С. 119—137.
- [4] *Иванов О.П.* Природа мегацунами и возможности прогноза // «Синергетика. Труды семинара». Материалы конференции «Самоорганизация и синергетика». — М.: МГУ. — 2006. — № 8. — С. 294—307.
- [5] *Мазур И.И., Иванов О.П.* Опасные природные процессы. — М.: Экономика, 2004.
- [6] *Кауффман С.* Антихаос и приспособление // *В мире науки*. — 1991. — № 10. — С. 58.
- [7] *Иванов О.П.* Причины различия эволюции Биосферы и Общества, экологические следствия и методология выхода. «Синергетика. Труды семинара». Естественнонаучные, социальные и гуманитарные аспекты. — М.: МГУ, 2003. — Т. 7. — С. 51—68.