

УДК 508.03

## СЛУЧАЙНОСТЬ КАК ИСТОЧНИК ОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУР

Д.Д. Соколов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

*Обсуждаются различные сценарии образования структур, которые предлагаются современной физикой, и их возможная роль в биологии. В частности, рассматривается образование структур в результате совместного действия случая и неустойчивости.*

Предмет морфологии принадлежит не только биологии, но входит как составная часть во многие науки. Распознавание морфологических признаков, выделение на основании этих признаков таксономических классов и последующая реконструкция эволюционных процессов, приводящих к наблюдаемому разнообразию форм, занимает, скажем, специалиста по физике звезд не меньше, чем биолога. Повседневный опыт говорит о том, что разнообразие живой природы в каком-то отношении богаче, чем разнообразие мира звезд или минералов, однако современная наука делает лишь первые шаги для того, чтобы выразить это соотношение количественно. Нужно быть очень смелым человеком для того, чтобы утверждать *a priori*, что число звезд в наблюдаемой части Вселенной много меньше числа живых организмов на Земле, число физически различных таксономических классов звезд намного меньше числа таксономических классов живых существ на Земле, а процессы звездной эволюции – принципиально проще эволюции жизни на Земле, хотя по крайней мере некоторые из этих утверждений сами по себе представляются вероятными. Более того, установление связи между эволюцией живой природы и предшествующей эволюцией неживой природы кажется естественной составляющей в изучении самого феномена жизни [3].

Проблема соотношения морфологии, таксономии и эволюции живого и неживого естественно возникает на всех уровнях анализа окружающего мира. На основании наблюдения сложной морфологии нам хочется умозаключить о наличии сложной и, в перспективе, целесообразной или даже разумной динамике, приводящей к этой морфологии, однако многочисленные примеры (хотя бы кристаллизации) убеждают в опасности такого умозаключения. В данной связи вспоминается народная мудрость о том, что центральная проблема теории искусственного интеллекта вырастает из серьезных сомнений в наличии интеллекта естественного.

До середины прошлого века физика располагала только одним сценарием для описания упорядоченных объектов: в ходе эволюции замкнутой системы ее энтропия растет, а порядок соответственно уменьшается. Несмотря на впечатляющие практические примеры (порядок на рабочем столе неудержимо падает со временем, даже несмотря на титанические усилия по его поддержанию), очевидно, что этот сценарий тепловой смерти Вселенной каким-то образом неполон. Принято говорить, что живому свойственно антиэнтропийное, самоупорядочивающееся развитие, которое является характерным свойством живого (см. обзор различных точек зрения в [3]). Во второй половине XX в. школа И. Пригожина указала на важность разнообразных нелинейных процессов для возникновения порядка из хаоса в сравнительно простых физических системах. В настоящее время этой тематике посвящены сотни работ, а в МГУ, например, под руководством ректора работает постоянно действующий семинар, посвященный данной проблеме [1].

Однако оказывается, что нелинейность и сложность системы совсем не являются необходимым и для того, чтобы простая физическая система могла

имитировать организованное поведение, сопровождающееся образованием характерных структур. Оказывается, что совместная игра неустойчивости и случайности успешно справляется с этим и в самых простых физических системах. Далее мы излагаем основные идеи книги [5]. Замечательно, что первоначальные интересы авторов, писавших эту книгу, не выходили за рамки традиционных проблем физики (проблемы турбулентных течений жидкости, теория горения, магнитная гидродинамика и т.п.), поэтому изложение исходного иллюстративного примера книги в терминах микробиологии следует рассматривать как чистую случайность, призванную облегчить чтение насыщенного математическими формулами текста. Когда через несколько лет обнаружили ссылки и обсуждение результатов книги в специальных микробиологических исследованиях, это было неожиданностью для авторов.

Итак, рассмотрим популяцию микроорганизмов, живущую в неоднородной, случайной среде. Будем предполагать, что свойства среды меняются в пространстве таким образом, что скорость размножения микроорганизмов  $U$  в среднем равна нулю и случайно (по Гауссу) меняется в пространстве. Будем для начала предполагать, что микроорганизмы не могут перемещаться в пространстве и их плотность на протяжении всего рассматриваемого времени эволюции достаточно мала для того, чтобы ресурсы системы можно было рассматривать как неисчерпаемые, а микроорганизмы – свободно размножающимися. Будем также считать, что начальное распределение микроорганизмов однородно в пространстве. Эта задача легко перелagается на язык уравнений с частными производными, которые выдают очевидный ответ – плотность микроорганизмов растет в каждой точке экспоненциально со скоростью  $U$ , которая случайна и в каждой точке своя. Естественно, и само распределение микроорганизмов в каждый момент времени случайно. Учебник советует характеризовать его средним значением и характерным отклонением флуктуаций. Простое упражнение по теории вероятностей позволяет вычислить поведение соответствующих величин. Оказывается, что обе эти величины растут как  $\exp(at^2)$ , причем показатель  $a$  (приятно, что его называют показателем Ляпунова) для характерного отклонения больше, чем для среднего. Быть может, на человека, не привыкшего мыслить формулами, это сообщение еще не производит особого впечатления, однако человек, помнящий стандартный курс физики, сразу же говорит, что этого быть не может. Дело в том, что функция  $\exp t^2$  растет несравненно быстрее функции  $\exp t$ . Получается, что плотность популяции растет экспоненциально, а ее среднее значение – намного быстрее, суперэкспоненциально. Вспоминается встреча Вейка в сумасшедшем доме с профессором математики, утверждавшим, что внутри Земли есть шар, много больше Земли в диаметре.

Разрешение парадокса в том, что гауссова случайная величина  $U$  пусть и с ничтожной вероятностью может быть сколь угодно велика. Поэтому усредненные характеристики плотности популяции определяются вовсе не типичными точками пространства, а очень небольшим набором точек, образующим своеобразную структуру. В этих точках скорость роста популяции аномально велика. Сама структура эволюционирует со временем, причем характер этой эволюции обнаруживает много общего с известными из опыта свойствами живых организмов. До сих пор мы говорили о микроорганизмах и целях политической корректности, а также потому, что для них не вызывает сомнения, что в пределе малых плотностей скорость прироста плотности пропорциональна самой плотности, т.е. мы имеем дело с линейной системой. Для более высокоорганизованных организмов это не представляется заранее очевидным, однако демографы принимают подобную модель без лишних обсуждений.

Свойства образующейся структуры удается описать количественно. Для того чтобы сделать результаты более наглядными, имеет смысл разрешить рассматриваемым микроорганизмам переноситься с места на место с помощью

умеренной диффузии. Это несколько осложняет вычисления, однако мы приводим лишь конечные результаты.

Оказывается, что после введения в модель диффузионного переноса поведение плотности микроорганизмов в окрестности данной точки быстро перестает зависеть от того, какова скорость роста в данной точке  $M$ . За счет диффузии важно только, каково значение скорости  $U_1$  роста в ближайшей точке  $M_1$ , где она достигает локального максимума. Через некоторое время диффузия доносит до изучаемой окрестности микроорганизмы, которые родились вблизи точки  $M_2$ , которая расположена дальше, чем  $M_1$ , зато в ней скорость роста  $U_2$  больше, чем во всем шаре радиуса  $MM_2$ . Далее точка  $M$  попадает в сферу влияния следующего рекордного значения скорости роста  $U_3$  и т. д. На этом этапе говорить о популяции микроорганизмов становится неинтересно. Лучше почитать книгу Ф. Броделя [2] о развитии капитализма. Как пишет Бродель, с начала развития капитализма хозяйственная активность определялась тем, что происходит в городах Северной Италии, потом пальму первенства перехватили ярмарки в Шампани, потом в игру вступил Антверпен, далее жизнь определял Лондон, а затем Нью-Йорк. Современные газеты пишут, что со дня на день пальму первенства перехватит Пекин. Печально, что подобное, по-видимому, высокоорганизованное поведение не требует ничего большего, чем неустойчивость и случайность.

Задача о развитии неустойчивости в случайной среде допускает разнообразные обобщения, допускающие количественное исследование. Оно обнаруживает разнообразные детали развивающейся структуры, причем эти детали неприятно похожи на известные нам реалии жизни. Например, выясняется, что возникающие центры роста – города – соединяются линейными структурами – дорогами. Внесение нестационарности в среду позволяет разнообразить явление. Например, выясняется, что частые реорганизации среды чрезвычайно отрицательно сказываются на росте типичной части популяции, однако совсем не мешают доминировать отдельным центрам влияния. Определенное моральное удовлетворение связано с тем, что теперь эти центры влияния погибают не только в результате порабощения более удачливыми соседями, но и в силу естественных причин.

Расстояние между конкурирующими центрами влияния растет со временем. В рамках описываемой модели удается воспроизвести даже явление глобализации. Если область, в которой развивается популяция, велика, но ограничена, то со временем в ней помещается только один центр влияния, который и определяет все поведение системы до тех пор, пока он не погибнет в силу внутренней эволюции. Это явление тоже естественно вписывается в картину, нарисованную Броделем.

В физике описываемое явление принято называть перемежаемостью. Говорят, что это слово пришло из медицины, где оно применяется к сердечной деятельности в ситуации, когда пациент скорее жив, чем мертв.

Со временем эволюция популяции становится нелинейной хотя бы из-за ограниченности ресурсов среды (все, что можно расхитить, уже расхищено). В этом случае ее поведение становится более сложным, однако поддающимся описанию. Черты перемежаемости сохраняются и в этом случае [4], однако уже не носят подобного гротескного характера.

Конечно, воспроизведение сложного и, как считается, до некоторой степени рационального поведения человечества данной простой моделью не приводит к неизбежности пессимистических умозаключений о судьбе человечества, а критический анализ модели обнаруживает в ней разнообразные натяжки и нестыковки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Время, хаос и математические проблемы: тр. семинара. М., 2000. Т. 2.
2. Бродель Ф. Материальная цивилизация, экономика и капитализм, XV – XVIII вв. М., 2006. Т. 1. Структуры повседневности: возможное и невозможное.
3. Галимов Э.М. Феномен жизни. Между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции. М., 2001.
4. Zeldovich Ya.B., Ruzmaikin A.A., Sokoloff D.D. Self-excitation of a nonlinear scalar field in a random medium // Proc. Natl. Acad. Sci. USA, V. 84. P. 6323 – 6325
5. Zeldovich Ya.B., Ruzmaikin A.A., Sokoloff D.D. The Almighty chance. Singapore, 1990.

CHANCE AS A SOURCE FOR STRUCTURE FORMATION

**D.D. Sokoloff**

Lomonosov Moscow State University, Moscow

*Various scenario of structure formation suggested in contemporary physics and its importance for the life science is discussed. In particular, we discuss a role of chance in structure formation.*