

Тема семинара

Методологические основы синергетики и ее социальные аппликации

Доклад

Методологические основы синергетики и ее применения



*Д.С. Чернавский,
доктор физико-математических
наук*

I. Введение. Что такое синергетика

«Истоки синергетики — математические модели в физике, химии, биологии, социологии и экономике».

Первая конференция на эту тему состоялась в Пущино в 1965 г. [1]. Направление развивалось, и в 1973 г. Г. Хакен [2] предложил его название — «синергетика» (от греческого «син эргос», что означает совместное действие).

Это название в России вначале было принято негативно. То, что Г. Хакен назвал «синергетикой», развивалось и ранее, но называлось иначе — так же, как и конференция в Пущино. Название четкое, хотя и длинное; казалось, что нет необходимости предлагать другое название. Тем более, смысл слова «синергетика» не вполне ясен, хотя звучит оно романтично и волнующе.

Однако далее выяснилось, что короткое и яркое *слово* объединило ученых разных дисциплин и в целом сыграло положительную роль. В России это название было принято.

В разное время было проведено несколько международных конференций по синергетике с участием Г. Хакена и И.Р. Пригожина. Прошли они в Пущино, чем подчеркивалась их связь с ранее проводимыми конференциями по математическому моделированию.

В США название «синергетика» не прижилось и было заменено словом «сложность». Смысл его тоже размыт, поскольку общепринятого определения сложности не существует. Фактически цели и задачи этого направления те же, что и синергетики, речь идет лишь о терминологической разнице.

Какое название станет общепринятым — дело будущего. Мы далее будем использовать термин «синергетика».

В настоящее время можно дать следующее определение: синергетика — научное направление, цель которого — объединение наук точных, естественных и гуманитарных (возрождение в науке эпохи Ренессанса.)

Задачи синергетики — те же, что и в любой другой науке:

1. Спрогнозировать поведение объекта (явления, процесса) в случае, когда это возможно.
2. Отказаться от прогноза, когда в рамках существующих методов (моделей, теорий и т. д.) он невозможен. Т.е. определить границы применимости прогноза, в частности т. н. временной горизонт прогнозирования.
3. Предсказать, каким будет отклик объекта на внешнее воздействие.

Особенности синергетики в том, что эти задачи ставятся и решаются в разных областях науки. Поэтому ответить на вопрос «что является предметом синергетики?» непросто (позже мы к этому вернемся).

В связи с этим встают дополнительные задачи.

1. Найти общее в явлениях физических — химических, биологических и т. д. — и сформулировать это общее на математическом языке (т. е. в форме модели).
2. Разработать общий для упомянутых наук язык и понятийный аппарат.

На этом пути встают трудности.

Так, гуманитарии мыслят конкретными образами и аналогиями. Набор образов достаточно широк, но недостаточно четок. Понятия также определены недостаточно четко и используются в различных смыслах (что приводит к недоразумениям).

Математики мыслят уравнениями и формулами. Здесь понятия определены достаточно четко, но набор их узок.

Представители естественных наук мыслят как естественными (конкретными) образами, так и математическими категориями (речь идет о теоретических разделах естественных наук).

Необходимо разработать язык образов (и связанных с ним понятий), достаточно общих (не обязательно конкретных) и адекватных математическим моделям. Последнее означает, что понятия должны быть определены четко и однозначно. В синергетике такой язык образов создается и используется — это язык фазовых портретов (позже мы обсудим его детальнее).

II. Методология синергетики (основные методы построения моделей и решения задач)

Ни на что особенно новое в методологическом плане синергетика не претендует. Тем не менее, отметим некоторые ее особенности.

1. В методологии любой науки важна постановка задачи. От этого зависят и выбор метода ее решения, и само решение.

В синергетике требуется четкая постановка задачи.

Во-первых, это значит, что должна быть сформулирована цель, ради которой решается данная задача. Целью может служить выяснение механизма наблюдаемого явления (процесса, объекта), прогноз поведения объекта и реакция его на внешние воздействия.

Во-вторых, необходимо указать, с какой точностью заданы начальные условия и какова должна быть точность результата в соответствии с целью.

Эти условия характерны для прикладных наук, но при решении фундаментальных проблем часто упускаются из виду, хотя и в них они тоже существенны.

Пример бесцельной задачи проведен у Н.В. Гоголя. Его герой — Кифа Мокиевич — решал проблему: «что если бы слон яйца нес. Чай скорлупа была бы толстая, обыкновенной пушкой не прошибешь». Правда, вывод Кифа Мокиевич делал вполне практический и актуальный: «надо новое оружие выдумывать».

Пример не такой уж абстрактный. В современных теоретических дисциплинах часто ставятся задачи по исследованию свойств несуществующих объектов. В результате область замыкается в себе, в ней решаются внутренние задачи, и наука превращается в «игру в бисер». В синергетике это не принято.

В синергетике требуется четкая постановка задачи:

- а) определение цели, с которой она решается;
- б) определение точности исходных данных и результатов в соответствии с целью.

Бесцельные задачи в синергетике не рассматриваются.

2. При решении каждой задачи встает вопрос: можно ли решить ее, исходя из «первых принципов»? Последнее означает использование широко известных моделей (Ньютона, Максвелла и др.), именуемых законами природы.

В сравнительно простых задачах используется именно этот путь. Принято считать, что построение модели (теории) — удел гениев. Удел обычных ученых — решать уравнения, не проявляя сомнений в их истинности. Многие полагают, что таким образом можно решить все задачи. Такой подход называется «физический редукционизм».

Более сложные задачи (именно такими занимается синергетика) исходя из «первых принципов» решить невозможно [3,4]. (Ниже мы к этому вернемся). В этих случаях необходимо строить модель явления самостоятельно. Именно этим и занимается синергетика. Таким образом, главное в синерге-

тике — построение математической модели явления в виде динамической системы уравнений. Заметим, что в естественных науках главное — это решение уравнений. Иными словами, большинство ученых — решатели известных уравнений. Ученый-синергетик в первую очередь — творец уравнений и лишь затем — решатель.

В связи с этим в синергетике развиты методы построения моделей. Подчеркнем, что речь идет не об однозначных алгоритмах, а о рецептах построения моделей. Формализовать этот процесс полностью невозможно, поскольку он творческий и содержит элементы искусства.

Эти рецепты сводятся к следующему.

Во-первых, модели строятся поэтапно и, соответственно, существуют два типа моделей: базовые и имитационные. Вторые строятся на основе первых путем их детализации. Задача базовых моделей — качественное описание явления. При этом высокой точности результатов и исходных положений не требуется. Базовая модель должна быть простой и должна содержать минимальное число уравнений, переменных и параметров. Так, для описания колебательных процессов достаточно двух уравнений, для описания динамического хаоса — трех. В теории катастроф [5] приведена классификация базовых уравнений по сложности (мерой сложности предложено считать «коразмерность» — индекс, учитывающий число уравнений и степень нелинейности). Реально в синергетике используются базовые модели из двух и трех уравнений.

При исследовании базовых моделей — определение бифуркаций, срывов и других катастроф — используется метод построения фазового портрета, о котором пойдет речь ниже.

Для иллюстрации приведем известный пример базовой модели «хищник — жертва». Натуралистами (охотниками, рыболовами) была поставлена задача: объяснить механизм явления — периодического изменения численностей хищников и жертв. Математики Лотка и Вольтерра предложи-

ли модель из двух уравнений. В основу ее были положены поведенческие реакции хищников (в частности то, что они размножаются только будучи сытыми). Модель описывала колебания численностей хищников и жертв в противофазе. Высокой точности не требовалось, достаточно было прогнозов на уровне «много» — «мало». Впоследствии именно эта модель легла в основу многих имитационных моделей в биологии, экологии, социологии и экономике.

Во-вторых, имитационные модели строятся на основе базовых путем их уточнения и учета дополнительных переменных и параметров. Их задача — давать количественные предсказания в конкретных условиях. При этом качественные свойства базовой модели сохраняются (или меняются мало). Наличие и характер бифуркаций и катастроф в имитационной модели те же, что и в породившей ее базовой модели.

Важно, что объединение разных дисциплин происходит на уровне базовых моделей. На уровне имитационных моделей это невозможно, поскольку последние конкретны и буквальное перенесение их в другую область нецелесообразно.

3. Объектом исследования синергетики в основном являются развивающиеся системы. В них весьма важную роль играет понятие «информация». Это не случайно, поскольку развитие системы предполагает возникновение в ней новой информации и нового качества.

Слово «информация» употребляется довольно часто, но в разных смыслах (а иногда и без всякого смысла, т. е. всуе). Общепринятого определения этого понятия пока нет. Это естественно, поскольку общепризнанные определения появляются в науке, когда она становится классической и перестает развиваться. Относительно науки об информации этого, к счастью, сказать нельзя.

Нужно ли вообще определять это понятие? Вопрос не праздный, поскольку многие ученые придерживаются мнения о том, что «информация есть информация и ничто другое, и этого достаточно». Действительно, до недавнего време-

ни слово «информация» использовалось в обыденной жизни и в практических задачах (шифровка, связь и т. д.). Там было достаточно понимания, о чем идет речь на интуитивном или сугубо прикладном уровне.

В последнее время стало ясно, что в развивающихся системах информация играет фундаментальную роль. Возникла потребность понять, что же это такое? Попытки связать информацию с привычными понятиями «материя» или «энергия» успехом не увенчались. Стало ясно: «информация есть информация, а не материя и не энергия» [6]. Отрицание не может претендовать на роль определения; вместе с тем, в данном случае оно существенно, ибо указывает на *отсутствие* вещественного (и/или полевого) происхождения информации. Попытки связать информацию с энтропией тоже оказались безуспешными, хотя они продолжают до сих пор (подробнее мы обсудим это позже). Поэтому вопрос об определении понятия «информация» остается открытым.

Это определение должно быть конструктивным, т. е. из него должны вытекать следствия, помогающие строить модели эволюции информации. Необходимо учитывать также, что слово «информация» всегда сопровождается дополнениями: макро (микро), условная (безусловная), ценная (не ценная). Эти дополнения означают, что имеются разные типы информации. В большинстве предлагаемых определений это обстоятельство не учитывается. Приведем некоторые из них (подробнее см. [4.7]).

Наиболее популярно определение Шеннона [8]: «Информация есть уменьшение неопределенности». Оно отражает одно из свойств информации, но в целом не конструктивно, поскольку не помогает исследовать процесс ее возникновения.

Во многих определениях информация отождествляется со сведениями, что по существу является тавтологией.

Существуют определения, смысл которых нечеток. Их можно суммировать словами: «Информация есть отражение отображения наших соображений». Такого определения

в литературе нет. По стилю оно соответствует миниатюре Козьмы Пруткова «Спор древних греческих ученых о прекрасном».

Мы будем использовать определение, данное Кастреллом [8]: «Информация есть запомненный выбор одного варианта из n возможных и равноправных».

Слово «запомненный» важно, поскольку речь идет о макроинформации. Принципиально незапоминаемый выбор — микроинформация. Примером ее может служить выбор определенных координат и импульсов молекул в сосуде с газом (т. е. выбор одного из возможных микросостояний). Оно существует в течение времени порядка одной флуктуации (10^{-13} с) и тут же забывается (сменяется другим). Это свойство — забывать предыдущее состояние — является основой термодинамики и причиной роста энтропии. Связь микроинформации с энтропией широко обсуждалась в теоретической физике в связи с парадоксом «Демона Максвелла». Тогда же возникло утверждение: «информация есть не-энтропия». Утверждение не верное, поскольку в нем не указано, что речь идет о микроинформации (незапоминаемой). Последняя в жизни роли не играет.

В реальных задачах используется макроинформация (запоминаемая хотя бы на время ее использования), которая к физической энтропии прямого отношения не имеет. Поэтому далее приставку «макро» мы опустим.

Слово «выбор» означает, что информация может возникнуть двумя разными путями.

Если выбор вынужден (т. е. продиктован извне или предшествующими обстоятельствами), то говорят о рецепции информации. Если имеет место свободный выбор (например, при принятии решения в условиях неопределенности), то говорят о возникновении (генерации) информации. В реальных случаях, как правило, имеет место и то, и другое.

Слова «возможных и равноправных» означают, что варианты выбора принадлежат одному множеству. В идеале вари-

анты могут быть полностью равноправны и равновероятны, но могут и отличаться. В этом случае слово «равноправные» означает, что априорные вероятности различных выборов — величины одного порядка.

Условная информация — выбор, сделанный в сообществе живых существ в результате договоренности (например, в человеческом обществе).

Пример условной информации — код, которым пользуются, чтобы зашифровать сообщение. Кодом называется соответствие между условными символами и реальными предметами (и/или действиями). Выбор варианта кода производится случайно и запоминается как передающей, так и принимающей стороной. Ценной кодовая информация может быть только в том случае, если ею владеют несколько объектов (человек), т. е. эта информация связана с коллективным поведением (общественной деятельностью).

Условной является также информация, содержащаяся в алфавите и словарном запасе языка.

Условной является и кодовая генетическая информация.

Безусловной является информация о реально происходящих событиях. Она не нуждается в согласовании и может рецептироваться информационной системой даже без участия человека. Эта информация может возникать случайно, но без участия человека (или иных живых существ).

Например, утверждение о том, что в такое-то время в таком-то месте произошло землетрясение, является безусловной информацией. В основе самого события — случайность, выбор, но зафиксировано оно с помощью сейсмографов многими сейсмостанциями Земли вполне закономерно (приборы настроены на запись колебаний почвы). Наблюдатели узнают о событии из сейсмограмм. Рецепция события, таким образом, не содержит элемента случайности.

Для пояснения сказанного приведем еще один пример. Допустим, что один астроном в ходе наблюдений открыл новую звезду — это безусловная информация. Другой астро-

ном ничего не открывал, но придумал для нее название — это генерация условной информации. Часто бывает так, что второй оказывается более популярным, и именно ему приписывается честь открытия.

Условная информация имеет ряд свойств.

Первое. Условная информация имеет тенденцию к унификации, что естественно, поскольку при этом возрастают ее ценность и эффективность.

Второе. Унифицированная условная информация часто воспринимается как безусловная.

Третье. Наиболее интересным и острым остается вопрос об условности (или безусловности) информации в естественных науках. Принято думать, что изучая природу мы рецептируем безусловную, вполне объективную информацию. Это действительно так, если речь идет об экспериментальных качественных результатах. Однако при формализации их (создании на их основе модели или теории) неизбежно используется общепринятый язык, который уже является условной информацией.

Важное свойство информации — ее ценность.

Ценность информации зависит от цели ее использования и согласно [10,11] определяется как:

$$W = \log_2 \frac{P_{fin}}{P_{in}}, \quad (1)$$

где P_{in} и P_{fin} — вероятности достижения цели до и после получения информации

Количество информации определяется как:

$$I = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i = \log_2 n \quad (2)$$

Оно измеряется в «битах», один бит соответствует выбору одного варианта из двух. В тех же единицах измеряется и ценность (в случае выбора одного из двух $P_{fin} = 1$, $P_{in} = 1/2$, $W = 1$).

Ценность W и количество I не постоянны и могут изменяться при эволюции системы.

Ниже мы покажем, как используются эти определения в конкретном примере.

Неустойчивость — явление, которое в синергетике играет фундаментальную роль. Известно его определение: неустойчивость (устойчивость) — свойство отклика системы на малые внешние возмущения. Динамика их, пока они малы, описывается линеаризованными уравнениями, решения которых имеют вид:

$$\delta u_i(t) = \sum_j^n \varepsilon_{i,j} \exp \lambda_j t \quad (3)$$

где $\delta u_i(t)$ — отклик в момент времени t ; $\varepsilon_{i,j}$ — величины, пропорциональные начальным возмущениям $\delta u_i(0)$; n — число независимых переменных и λ_j — числа Ляпунова.

Система считается устойчивой, если все числа Ляпунова (точнее их реальные части) отрицательны, тогда возмущения со временем уменьшаются.

Если хотя бы одно из чисел Ляпунова положительно — система неустойчива, и возмущения возрастают со временем экспоненциально.

Подчеркнем важное свойство чисел Ляпунова: они не зависят от начальных условий. Таким образом, устойчивость (или неустойчивость) — внутреннее свойство исследуемой системы, а не результат внешнего воздействия. Особенность его в том, что проявляется оно только при наличии малых внешних воздействий.

Эта особенность приводит к важным методологическим последствиям. Сейчас приходится пересматривать и подвергать ревизии некоторые, казалось бы, установившиеся в физике понятия.

Обсудим три примера.

Рассмотрим понятие абсолютно изолированной системы. Сейчас ясно, что его можно (и то не всегда) ввести лишь как

предел неизолированной системы при стремлении к нулю величины внешнего воздействия. Для устойчивых систем такой предел существует и, следовательно, понятие остается в силе. В неустойчивых системах такой предел, вообще говоря, не существует. Действительно, предел величины $\delta u(t)$ (при $\lambda > 0$) при $\varepsilon \rightarrow 0$ и $t \rightarrow \infty$ зависит от порядка стремления аргументов к своим пределам. Формально величину ε (которая отражает меру внешних воздействий) и время t можно считать независимыми. Однако, как мы убедились на конкретном примере, уже при сравнительно небольших временах фактор $e^{\lambda t}$ возрастает столь сильно, что компенсировать его уменьшением ε — задача абсурдная. Суть дела здесь в том, что экспоненциальная зависимость ($explt$) очень сильна, конкурировать с ней практически невозможно. Поэтому для неустойчивых систем понятие «абсолютно изолированная система» теряет смысл; можно говорить об относительно изолированной системе.

В связи с явлением неустойчивости возникает необходимость пересмотреть такие понятия, как «бесконечно малое» и «бесконечно большое». Ясно, что при небольших временах (таких что $t \approx 1/Re\lambda$) и $\delta u_i(t) \ll 1$, т. е. отклонения $\delta u(t)$ малы и возмущением можно пренебречь. При этом динамическим расчетам можно доверять даже в случае их неустойчивости. Время $t \approx 1/Re\lambda$ называется интервалом предсказуемости (или горизонтом прогнозирования).

Ясно также, что при больших временах (таких что $Re\lambda \cdot t = 100-1000$) отклонение $\delta u_i(t)$ станет большим при любых реальных возмущениях. Действительно, для того, чтобы пренебречь возмущениями в этом случае необходимо изолировать систему с точностью до $\delta u_i(0) \leq e^{-1000}$, что невозможно.

Здесь не обсуждалось, какую размерность имеют величины $\delta u_i(t)$ и $\delta u_i(0)$ и в каких единицах они измерены. В данном случае это и не важно. Дело в том, что любые физические величины (длины, массы, временные интервалы, числа частиц и т. д.) в нашем мире ограничены, т. е. выражаются

числами в интервале от 10^{-100} до 10^{+100} . Большие (или меньшие) числа могут появиться лишь как результат расчета, в котором фигурирует экспоненциальная (или более мощная) функция. В связи с этим Эдвардом Каснером (см. в [12]) было введено новое понятие «гугол» — столь большое число (больше 10^{+100}), которое не может соответствовать никакой физической величине.

Возмущение является физической величиной. Отсюда следует, что начальное отклонение не может быть меньше 10^{-100} , в то время как величина $Re\lambda \cdot t$ вполне может стать больше 100. Обратный гугол, хотя формально является конечной величиной, реально должен рассматриваться как бесконечно малая. В частности, вопрос: как ведет себя функция внутри интервала порядка обратный гугол, лишен смысла. Функцию на таком интервале следует заменить числом (средним по интервалу), поскольку более детальное ее поведение принципиально не наблюдаемо. Это утверждение. Хотя и негативно, но оно играет важную практическую роль, что мы продемонстрируем позже.

Требует ревизии и понятие «причины». Обычно под причиной понимают начальные условия (или импульсные внешние воздействия), которые в соответствии с динамикой системы приводят к определенному результату — т. е. следствию. На этом языке слова «вскрыть причинно-следственные связи» означают «понять динамику промежуточных процессов». При этом негласно предполагают, что причины и следствия соизмеримы. Для устойчивых (или нейтральных) процессов это всегда имеет место. В неустойчивых процессах ситуация иная: очень малая величина приводит к следствию, которое по масштабам с причиной не соизмеримо. Обычно в таких случаях говорят, что причиной явилась неустойчивость, а не малое начальное воздействие. При этом, однако, происходит весьма существенный сдвиг понятий: в качестве причины фигурирует внутреннее свойство системы, а не внешнее воздействие.

Поясним сказанное на житейском примере. Рассмотрим два случая. В первом — хрустальная ваза стоит на середине стола (состояние устойчиво). Прошел некто и неловким движением столкнул вазу со стола — она разбилась. В чем причина столь печального события или, другими словами, кто виноват? Ясно, что виноват «некто» а причина — его неловкое движение.

Рассмотрим другой случай: ваза стоит на краю стола так, что чуть не падает (состояние, близкое к неустойчивому). Пролетела муха — ваза разбилась. В этом случае муху не обвиняют, а говорят, что причина события — в неустойчивом положении вазы. Виноват тот, кто ее поставил (так, чтобы никто не был виноват, в жизни обычно не бывает). Забегая несколько вперед, отметим, что в основе утверждения «событие произошло случайно» (т. е. без причины) также лежит неустойчивость динамических процессов.

В общем случае выход из неустойчивого состояния возможен в разные стороны. Так, шарик, движущийся по водоразделу, может свалиться как вправо, так и влево. Направление зависит от начального возмущения.

В отсутствии выделенного направления принимается, что малые возмущения равновероятны. Здесь мы впервые употребляем слово «вероятность». В устойчивых динамических системах оно не употребляется и, более того, не имеет смысла. В неустойчивых системах, напротив, достоверные предсказания не имеют смысла и можно говорить лишь о вероятности того или иного результата. Таким образом, неустойчивость является тем свойством, которое позволяет ввести в динамическую теорию понятие «вероятность».

Из изложенного следует, что устойчивость (неустойчивость) — не просто одно из свойств динамической системы. Это свойство существенно расширяет и изменяет аксиоматику динамических систем и позволяет взглянуть на мир с иной точки зрения. Ярким следствием неустойчивости является «динамический хаос».

III. О фазовом портрете

Фазовый портрет — рисунок (образ), позволяющий исследовать основные свойства базовой модели, не прибегая к ее аналитическому решению. Иными словами, фазовые портреты — язык образный, абстрактный, но четкий — такой, что по фазовому портрету можно восстановить исходные положения модели и даже ее форму.

В этом разделе мы покажем на конкретных примерах, как строится фазовый портрет, как он читается и какие следствия из него вытекают.

Первый пример — базовая модель скрытого банкротства. Она применима к отдельной фирме, предприятию, выпускающему вредные отходы и вынужденному их устранять, и к миру в целом в связи с угрозой эколого-экономической катастрофы при переходе к т. н. устойчивому развитию.

Модель имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dM'}{dt'} &= -M' + \frac{\rho'}{1 + \rho'} - k' - \varepsilon' \cdot \rho', \\ \frac{d\rho'}{dt'} &= \beta \cdot \left(M' \cdot \chi - \frac{\rho'}{1 + \rho'} \right) \end{aligned} \quad (4a, 4б)$$

В ней в качестве переменных выбраны объем оборотных средств (M) и количество продукции на складе (P). Первый член в (4a) описывает производственные затраты, τ — время производственного цикла, второй член в (4a) представляет собой выручку от реализации продукции, ρ_m — рыночная цена, ρ — себестоимость товара, τ_c — время амортизации продукции на складе ($\tau_c \gg \tau$), последний член в (4a) описывает постоянные затраты, связанные с утилизацией отходов, и издержки на приобретение нового очистительного оборудования.

Фазовый портрет модели строится следующим образом.

По осям откладываются переменные M и P . Выбирается любая точка (M_0, P_0) и в ней вычисляются изменения переменных ΔM и ΔP за малое время Δt . Для этого достаточно

вычислить значения правых частей уравнений (4а) и (4б) в точке (M_0, P_0) , используя знания математики на уровне средней школы. Эти значения — составляющие вектора движения выбранной точки.

Если человек не ленив, то может вычислить вектора во многих других точках. В результате возникает поле направлений. По нему легко представить движение любой точки от начального состояния к конечному. Точка, выходящая из начального состояния, называется изображающей. Ее движение несет информацию о динамике системы, т. е. об изменении переменных со временем. Пример поля направлений приведен на рис. 1.

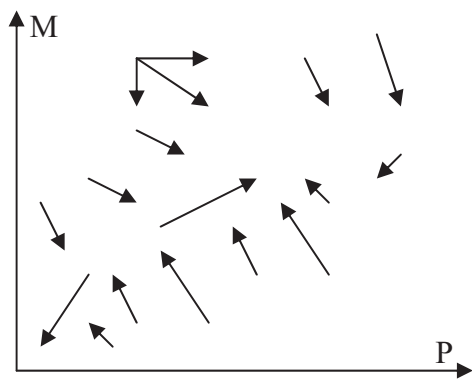


Рис. 1. Пример поля направлений

Если человек ленив (а таких большинство), то процедуру можно упростить. Для этого проводятся т. н. главные изоклины — линии, на которых вектора движения либо горизонтальны (при этом $\Delta M=0$), либо вертикальны ($\Delta P=0$).

Для проведения изоклины горизонталей достаточно приравнять правую часть (4а) нулю и выразить M как функцию P (что тоже находится в пределах школьного курса). Для проведения изоклины вертикалей достаточно приравнять нулю правую часть (4б). После этого, определив направление в

какой либо одной точке, далее можно ничего не вычислять. Действительно, направления в каждом отсеке между изоклинами известны и линии где они меняются, тоже. Фазовый портрет системы (4) приведен на рис. 2.

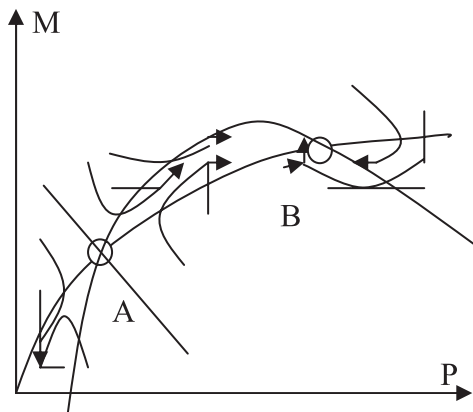


Рис. 2. Фазовый портрет системы

Изложенную процедуру можно поручить компьютеру (если человек им владеет), и он сам нарисует фазовый портрет.

Портрет дает визуальное (образное) представление о динамических свойствах системы. Пересечению изоклин соответствуют стационарные состояния.

В данном случае их два. Одно из них (B) — устойчивый узел, в нем предприятие работает стабильно. Другое (A) — неустойчиво (седло), через него проходит сепаратриса — линия, разделяющая две области притяжения. В одной из них система из любого начального состояния сама придет в устойчивое состояние.

Другая область — банкротство. В нем изображающая точка уходит из положительного квадранта, и динамические переменные становятся отрицательными.

Изменяя параметры можно влиять на положение и форму изоклин. Например, изоклину горизонталей можно по-

степенно понижать. При этом точки (А) и (В) сблизятся, сольются и исчезнут. Это значит, что вся плоскость становится областью банкротства. Важно при этом, что в начале, когда изоклины близки, изображающая точка движется медленно и банкротство незаметно (почему и называется скрытым). Однако когда изоклины расходятся, наступает быстрое (катастрофическое) падение. Т.о. из портрета следует, что кризис (банкротство) подкрадывается незаметно.

Из портрета видно, что избежать банкротства можно. Для этого нужно поднять изоклину горизонталей (или опустить изоклину вертикалей). Как это сделать — зависит от конкретных условий и значений параметров.

Т.о. базовая модель и ее фазовый портрет дают качественное представление о динамике системы и о том, как ею можно управлять. Для принятия количественных решений необходимо конкретизировать модель — сделать ее имитационной.

Другой пример — базовая модель борьбы условных информаций. Она была предложена для объяснения возникновения единого генетического кода. Затем она использовалась для описания взаимодействия однотипных видов, для описания и прогноза исторических событий и, наконец, для исследования взаимодействия валют в международной торговле.

В случае взаимодействия двух валют она принимает вид:

$$\frac{du_1}{dt} = C_1 u_1 - b_{1,2} u_1 u_2 - a_1 u_1^2 \quad (5a)$$

$$\frac{du_2}{dt} = C_2 u_2 - b_{2,1} u_2 u_1 - a_2 u_2^2 \quad (5б)$$

Здесь u_1 и u_2 — объемы национальных валют первой и второй страны. Соответственно, параметры C , b , a — комбинации реальных величин: ВВП, время оборота капитала и т. п. Один из наиболее важных параметров — $\beta_{i,j}$ — коэффи-

циент финансовой экспансии — доля валюты одной страны, используемая в другой.

Мы не будем останавливаться на обсуждении смысла коэффициентов и переменных (подробнее см. [4]).

Фазовый портрет модели при $\beta_{1,2} + \beta_{2,1} < 1$ приведен на рис. 3.

Строится он просто, поскольку в данном случае главные изоклины — прямые линии. Из портрета видно, что имеется одно устойчивое состояние, которое соответствует мирному сосуществованию валют.

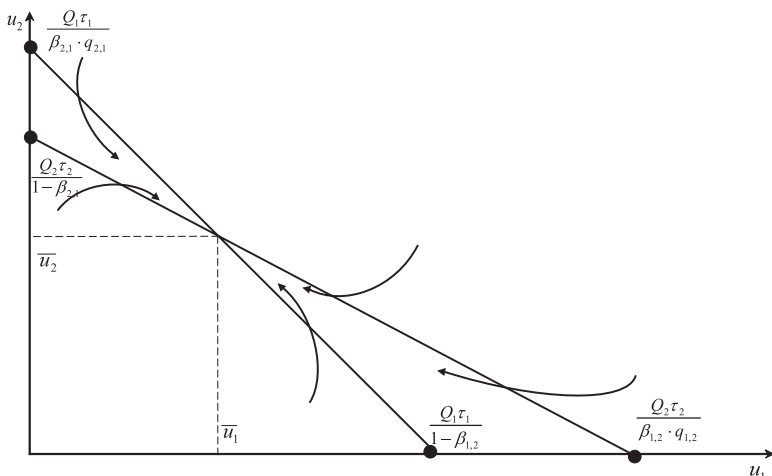


Рис. 3. Фазовый портрет модели при $\beta_{1,2} + \beta_{2,1} < 1$

Однако при $\beta_{1,2} + \beta_{2,1} > 1$ происходит бифуркация, и ситуация меняется. Сосуществование становится неустойчивым, и каждая из стран стремится полностью вытеснить другую с международного рынка. Фазовый портрет этой ситуации приведен на рис. 4.

Отметим, что в любой динамической системе реально присутствует «шум» — неизбежные флуктуации переменных и параметров. Они могут быть учтены добавлением в правые части случайных членов (метод Ланжевена).

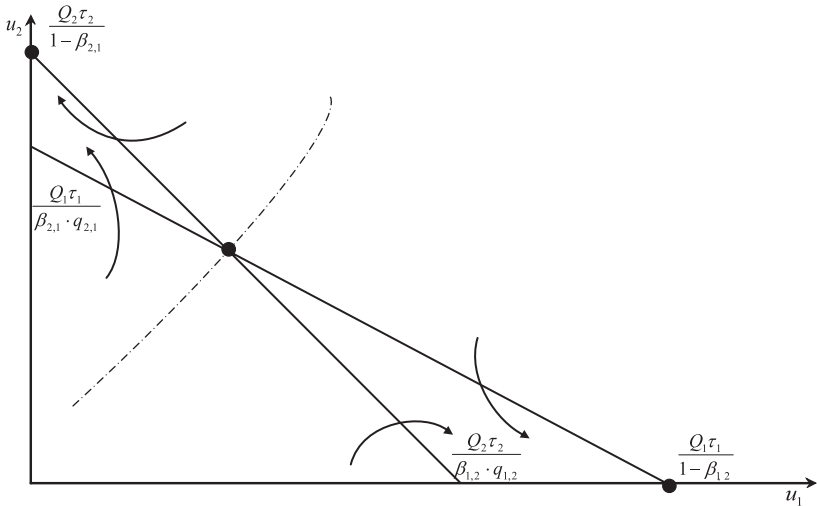


Рис. 4. Фазовый портрет модели при $\beta_{1,2} + \beta_{2,1} > 1$

В случае устойчивого состояния «шум» слегка размывает траектории и стационарные состояния, но к принципиальным изменениям не приводит.

В случае потери устойчивости «шум» усиливается, и хаотическая область покрывает значительную часть фазового пространства, что представлено на рис. 5.

Предсказать, что будет во время бифуркации и сразу после нее, невозможно. Однако само указание на такую возможность уже является результатом.

Отметим еще одно свойство фазового портрета — эстетическое. Оно проявляется, если фазовые портреты рассматривать как абстрактные картины. Сравнивая рис. 3 и рис. 5, можно отметить, что первый вызывает ощущение спокойствия, стабильности и даже скуки. Рис. 5, напротив, вызывает чувство тревоги и опасности, что соответствует изложенному выше.

Парадительно, как наш мозг может различать (распознавать) опасность и тревогу в абстрактных картинах и фазовых портретах, даже не представляя себе, что это такое.

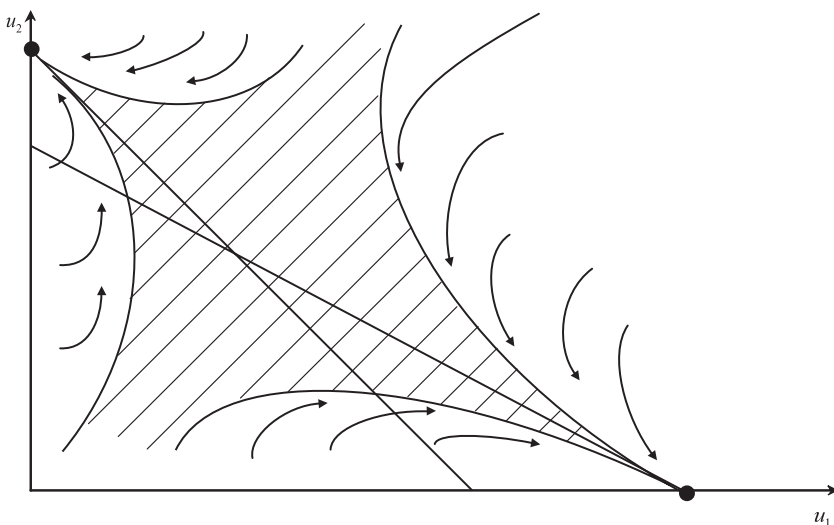


Рис. 5. Хаотическая область покрывает значительную часть фазового пространства

Заключение

Уместно вернуться к началу и обсудить более подробно, что есть синергетика в аспекте развития науки в целом.

Во времена Возрождения люди, создававшие современную науку, не разделялись на узких специалистов. Ярким примером того является Леонардо да Винчи.

С развитием науки произошло разделение на дисциплины — математика, физика, химия, биология и т. д. Появились узкие специалисты — профессионалы в своей дисциплине, области и не владеющие другими областями науки. Отдельные дисциплины стали называться «науками». Появился тезис: в каждой науке должны быть свой предмет и свой метод (иначе это не наука). В этом русле науки развивались в течение сотен лет.

В середине прошлого века каждая из наук подошла к границам своей ниши. Стало ясно, что наиболее актуальными

являются задачи, лежащие на стыке наук, т. е. междисциплинарные. Появились смежные дисциплины — физхимия, химфизика, биофизика и т. д.

Ответить на вопрос «что является предметом и методом в междисциплинарных исследованиях?» — непросто. Само понятие «предмет науки» здесь теряет смысл. По существу, само появление междисциплинарных наук и синергетики является антитезисом по отношению к тезису о «предмете и методе».

На стадии перехода от тезиса к антитезису возникают разногласия, дискуссии и разнообразие мнений (можно сказать, хаос мнений, что характерно для перемешивающего слоя) [4].

Это не случайно. В науке в целом есть две задачи: сохранить накопленные знания (это задача профессионалов) и создать новые (это удел творческих ученых). Задачи дополнительные (по Н. Бору) — это когда выполнение одной препятствует выполнению другой. (Разумеется, оба качества необходимы ученому, но каждый отдает предпочтение одному из них). Каждый ученый в какой то момент выбирает, чему отдать предпочтение, и этот выбор становится *его* информацией. Т.о. конфликт между профессионалами и творцами неизбежен, что гениально описано А.С. Пушкиным в миниатюре «Моцарт и Сальери».

В последнее время именно в междисциплинарных исследованиях получены наиболее важные результаты. Наступает время перехода от тезиса к антитезису и затем — к синтезу.

Синергетика — первая попытка осуществить этот синтез — разумеется, на новом, более высоком уровне знаний, чем в эпоху Ренессанса [13]. В настоящее время этот синтез еще не произошел, и путь к нему не будет простым и легким. Само название «синергетика», возможно, и не сохранится и будет заменено другим. Однако мы пока сохраним за синтетической наукой это название.

Ученый-синергетик не может быть узким специалистом в какой-либо одной области, но должен обладать определен-

ным уровнем профессионализма в смежных областях. Вместе с тем, он должен уметь синтезировать знания, накопленные в отдельных областях, и создавать на их основе новые знания. Иными словами, он должен обладать творческими способностями.

В современной науке больше ценится профессионализм, и большинство ученых — профессионалы. Решать междисциплинарные задачи им трудно. Поэтому в их среде бытуют «догмы» и «мифы». Приведем примеры.

1. В точных и естественных науках принято считать, что любое явление имеет причину и само является причиной следствий, задача науки — вскрыть причинно-следственные связи. Из изложенного ясно, что причинно-следственные связи существуют не всегда. Задача науки (синергетики) — выяснить условия, при которых они нарушаются.

2. В принципе невозможно описать процессы самополагания цели и свободного выбора (характерные для живых существ). Из изложенного видно, что в рамках синергетики эти процессы описать можно.

3. В рамках точных и естественных наук в принципе невозможно описать процессы мышления (в том числе интуитивного). В рамках синергетики это сделать можно, если четко сформулировать задачу: какое именно явление нужно описать и с какой точностью.

Подведем итог.

В современных естественных науках практически все упомянутые выше методы реально используются (часто без ссылок на синергетику). Поэтому можно сказать, что методология синергетики не содержит принципиально новых (ранее неизвестных) положений. Однако эти положения, собранные вместе, создают единую картину синтетической междисциплинарной науки, лишенной внутренних противоречий (и догм). Этот пакет положений можно рассматривать как методологию синергетики.

Литература

1. Колебательные процессы в биологических и химических системах. (Труды конференции в г. Пущино). М.: Наука, 1967.
2. *Хакен Г.* Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1965.
3. *Чернавский Д.С.* УФН. Т. 170, № 2. 2000. С. 157–183.
4. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. М.: Наука, 2001 г., М., УРСС, 2004, М., УРСС, 2009.
5. *Постон Тим, Стюарт Иен.* Теория катастроф. М.: Мир, 1980.
6. *Винер Н.* Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М.: Сов. Радио, 1968.
7. *Махлун Ф.* Производство и распространение знаний в США. М., 1966.
8. *Шеннон К.Е.* Бандвагон // Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963. С. 667.
9. *Кастлер Г.* Возникновение биологической организации. М. Мир, 1967.
10. *Бонгарт И.М.* Проблемы узнавания. М.: Наука, 1967. 220 с.
11. *Харкевич А.А.* О ценности информации // Проблемы кибернетики. Вып. 4. М., Физматгиз, 1960. С. 53–58.
12. *Хуков А.Б.* 1998, М., Квант, № 2. С. 32–33.
13. *Курдюмов С.П., Князева Е.Н.* Законы эволюции и самоорганизация сложных систем. М.: Наука, 1994.