



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 34 за 2013 г.



Ахромеева Т.С., Малинецкий Г.Г.,
Митин Н.А., Торопыгина С.А.

Синергетика и сетевая
реальность

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Синергетика и сетевая реальность / Т.С.Ахромеева [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 34. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-34>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

**Т.С. Ахромеева, Г.Г. Малинецкий,
Н.А. Митин, С.А. Торопыгина**

Синергетика и сетевая реальность

Москва — 2013

Т.С. Ахромеева, Г.Г. Малинецкий, Н.А. Митин, С.А. Торопыгина

Синергетика и сетевая реальность

АННОТАЦИЯ

В работе представлен ряд новых направлений теории самоорганизации – синергетики. Полученные при исследовании сетевых структур результаты позволяют утверждать, что синергетика находится на пороге научной революции. Обсуждается ряд актуальных приложений и развиваемых в настоящее время идей.

Ключевые слова: синергетика, самоорганизация, научная революция, сетевые структуры, фракталы, сетевая парадигма, самоорганизованная критичность, социальные сети

T.S. Akhromeyeva, G.G. Malinetskii, N.A. Mitin, S.A. Toropygina

Synergetics and network reality

ABSTRACT

We present a number of novel directions of the theory of self-organization – synergetics. The results obtained at the investigation of network structures allow to claim that synergetics is facing the scientific revolution. We discuss a number of actual applications and ideas developing now.

Key words: synergetics, self-organization, scientific revolution, network structures, fractals, network paradigm, self-organized criticality, social networks

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-01-00887-а, 13-01-00617-а).

Содержание

Парадигмы синергетики	4
Сетевая парадигма.....	11
Когнитивный императив и сетевые структуры.....	21
Мир сетевых социальных структур.....	24
Кризис вычислений	25
Сетевая реальность и новый облик социологии	27
Заключение.....	31

Для исследователя наука, приумножение знаний о природе, человеке и обществе являются самостоятельной ценностью. Для общества, однако, и знание, и наука как социальный институт, ориентированный на его получение, уточнение, сохранение, развитие, – это инструмент для достижения более безопасной, долгой, благополучной жизни людей, для расширения коридора возможностей общества.

Знание выступает в двух взаимосвязанных ипостасях. С одной стороны, это приписываемое Ф.Бэкону высказывание «Знание само по себе – сила» (*Knowledge itself is power*), в котором акцент делается на том, что информация и понимание дают возможности, повышают шансы достичь поставленных обществом целей (впрочем, как показало развитие науки в XIX и XX веке, они могут помочь и в уточнении, и в корректировке целей). С другой стороны, всё более важной становится трактовка знания С.Лемом, представленная в книге «Сумма технологии» – своеобразном манифесте развития технологической цивилизации [1]. В соответствии с ней, главная роль науки – служить основой для создания, поддержки, использования и обеспечения безопасности *технологий*. С этих двух позиций мы посмотрим на теорию самоорганизации и на те проблемы, которые она ставила и ставит перед прикладной математикой.

Организатор и первый директор Института прикладной математики (ИПМ), выдающийся математик, механик, «главный теоретик» космонавтики, академик М.В.Келдыш считал, что для того, чтобы страна во второй половине XX века имела реальный, а не «бумажный» суверенитет, она должна обладать *ядерными технологиями, космическими системами и надежными шифрами*. Третий директор ИПМ, один из основоположников теории самоорганизации, член-корр. РАН, С.П.Курдюмов полагал, что в XX веке к этим технологиям следует добавить *технологии проектирования будущего, высокие гуманитарные технологии, технологии сборки и разрушения социальных субъектов*. Первые позволяют выяснить, какие небольшие изменения в различных сферах жизнедеятельности сейчас могут существенно повлиять на траектории развития стран, регионов или мира в целом в 20-30-летней перспективе. Вторые дают ключ к развитию и наиболее эффективному использованию возможностей отдельных людей и коллективов. Третьи представляют инструменты для управления большим кругом социальных процессов. Все эти технологии междисциплинальны.

Одним из наиболее активно развиваемых в последние десятилетия междисциплинарных подходов является *теория самоорганизации*, или *синергетика* (от греческого – «совместное действие») [2].

Гегель и Маркс полагали, что приближение к объективной истине, ко всё более полному и точному описанию природы, общества и человека происходит равномерно, последовательно, монотонно.

Этот взгляд изменила выдвинутая американским историком науки Томасом Куном (1922-1995) *теория научных революций*. Рассматривая ис-

торию физики, он увидел существенно иную картину. В течение длительных периодов эволюционного развития науки исследователи уточняют и конкретизируют имеющееся знание. Уже до начала работы большинству из них ясно, какой результат, скорее всего, получится, и дело лишь в том, насколько быстро, точно и эффективно это будет сделано. Такой вид научной деятельности Т.Кун назвал «нормальной наукой».

Однако с течением времени количество противоречий в разрабатываемой картине реальности растет или возникают проблемы, требующие кардинального пересмотра сложившейся картины. Такое быстрое изменение ряда старых устоев происходит в ходе *научных революций*. В ходе таких революций создается новая *парадигма*, заменяющая старую.

В понятие парадигмы – одного из основополагающих концептов современной философии науки – Т.Кун вложил два смысла [3]. Во-первых, это беспрецедентное научное достижение, задающее новый, более высокий стандарт научных исследований. Во-вторых, это источник новых проблем и задач разного уровня, которыми может заниматься научное сообщество, развивая «нормальную науку».

Возраст человека определяется не только «формальным», календарным образом, но и содержательно – сделанными делами, пережитым, осмысленным. Естественно таким же образом измерять «реальный возраст» науки, сопоставляя его с числом тех парадигм, которые определяли ее развития. С этой точки зрения можно взглянуть и на синергетику.

ПАРАДИГМЫ СИНЕРГЕТИКИ

В рамках каждой парадигмы можно сформулировать глубокий, содержательный научный вопрос, ответ на который был дан в ходе соответствующей научной революции и построения связанных с ней научных теорий.

В конце XIX века с осознанием фундаментальности второго начала термодинамики, развитием статистической физики и кинетической теории газов, с доказательством H-теоремы стала ясной перспектива «тепловой смерти» нашей реальности. Но как же примирить этот вывод с наблюдаемой в течение миллионов лет геологической, химической, а затем и биологической эволюцией? Ведь данные палеонтологии наглядно показывают возникновение всё более сложных и всё лучше приспособляющихся к изменениям окружающей среды биологических видов. Что позволяет так эффективно действовать «демону Дарвина»?

Фундаментальный вопрос, который стоял перед естествознанием с XIX века, – «Что укрощает тепловую смерть?»

Ответ на него во многом связан с деятельностью Брюссельской научной школы, которую в течение многих лет возглавлял Илья Романович Пригожин (Нобелевская премия по химии 1977 года). В ходе произошедшей научной революции было убедительно показано, что в открытых, не-

линейных, далеких от равновесия, диссипативных (связанных с процессами необратимого рассеяния энергии – вязкостью, теплопроводностью, диффузией, электрическим сопротивлением и др.) системах возможно самопроизвольное возникновение упорядоченности, самоорганизация, появление структур различных типов.

Чтобы подчеркнуть принципиальную роль процессов рассеяния энергии, И.Р.Пригожин назвал возникающие упорядоченности *диссипативными структурами*. [4]

В ряде задач физики плазмы, теории горения и взрыва, в лазерной термохимии были предложены модели, описывающие процессы, связанные с неограниченным ростом за ограниченное время одной из характеризующих объект переменных. С легкой руки С.П.Курдюмова стали говорить, что такие процессы развиваются *в режиме с обострением*. Простейший и наиболее известный математический объект, демонстрирующий такую динамику и детально изученный в научной школе С.П.Курдюмова, – модель тепловых структур [5]

$$T_t = \operatorname{div}(kT^\sigma \operatorname{grad} T) + qT^\beta, \quad \beta > 1, \quad \sigma > 0.$$

Наконец, это могут быть своеобразные спиральные или бегущие волны в диссипативных средах, названные Р.В.Хохловым *автоволновыми процессами*, или *колебательные химические реакции*, открытые Б.П.Белоусовым. Все их объединяет диссипативность рассматриваемых нелинейных сред, которая выступает как творец упорядоченности.

В большинстве научных дисциплин новая парадигма среди прочего демонстрирует ограниченность или несостоятельность предшествующей.

В междисциплинарных подходах, по-видимому, дело обстоит иначе.

Например, сейчас парадигма диссипативных структур самым активным образом развивается в контексте нанонауки, наноинженерии, нанотехнологий. В самом деле, силовые туннельные микроскопы осуществили мечту ученых – видеть атомы и манипулировать ими. Они позволяют двигаться «сверху вниз» – с макроуровня к микророботам. Однако для того, чтобы создавать материалы нового поколения, микрообъекты с заданными свойствами, нужно освоить путь «снизу вверх». Надо научиться создавать условия, при которых в результате самоорганизации появляются нанобъекты, которые нам нужны, научиться проходить путь «снизу вверх» – от микрообъектов к макроструктурам. В случае фуллерена C_{60} и графена это удастся сделать. Но если всё ограничить ими, то будущее нанотехнологий не состоится.

Следующая парадигма синергетики также связана с фундаментальной проблемой, которую почти три века относили к категории философских. Исаак Ньютон сравнивал вселенную с гигантским часовым механизмом, ко-

торый создал бог и которому он дал первотолчок, не вмешиваясь далее в ход процессов.

Последователь Ньютона, выдающийся математик, механик, философ наполеоновской эпохи Пьер Симон Лаплас (1749-1827) развил этот взгляд. По его мысли, ум, достаточно мощный, чтобы принять в расчет координаты и скорости всех частиц во вселенной, мог бы заглянуть как угодно далеко и в будущее, и в прошлое. Такой взгляд, утверждающий полную предопределенность, получил название *лапласовского детерминизма*.

Таким образом, возникает фундаментальный вопрос: «Возможен ли глобальный прогноз? Существует ли свобода воли?» Лаплас настаивал на утвердительном ответе на первую половину этого вопроса. Но отсюда немедленно следует, что свободы воли нет, что все наши настоящие и будущие решения уже определены тем состоянием, в котором вселенная находилась в некоторый момент времени. Шекспир утверждал, что весь мир театр и мы в нем все актеры. Лаплас идет дальше: мир, в его понимании, – кукольный театр, и мы всего лишь куклы в чужих руках, которые ничего не решают.

Интересно, что именно Лаплас был основоположником теории вероятностей. Однако саму «вероятность» он считал лишь платой за наше незнание.

В представлении, что всё обстоит именно так, ученые прожили без малого 150 лет. Ситуацию изменила работа американского метеоролога Эдварда Лоренца (1917-2008) «О детерминированном непериодическом течении», появившаяся в 1963 году [6].

Однако простейшая математическая модель, показавшая, что всё может быть устроено именно так, как предполагал Э.Лоренц, появилась гораздо раньше. Эта модель была предложена Дж.Нейманом и С.М.Уламом в качестве инструмента для получения случайных чисел.

Модель Неймана и Улама получила название «отображение тент» (или «палатка»). Она определяет последовательность чисел $\{x_n\}$ по явной формуле:

$$x_{n+1} = 1 - 2|x_n|, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad x_1 = \tilde{x}.$$

Эту модель можно рассматривать как динамическую систему в случае дискретной временной переменной $n = 1, 2, 3, \dots$. Состояние системы в момент n характеризуется числом x_n . Последовательность $\{x_n\}$ однозначно определяется начальным значением \tilde{x} . Можно проверить, что если $-1 \leq \tilde{x} \leq 1$, то все элементы последовательности $\{x_n\}$ будут принадлежать интервалу $[-1, 1]$. Если \tilde{x} – иррациональное число из этого интервала, то и вся последовательность чисел $\{x_n\}$ не будет периодической.

Однако не эти любопытные свойства сделали модель «тент» классической, входящей во все учебники нелинейной динамики. Она позволяет проиллюстрировать удивительное свойство *чувствительности к начальным данным*. Рассмотрим две последовательности, которые генерирует обсуждаемое отображение $\{x'_n\}$ и $\{x''_n\}$. Для одной $x'_1 = a_1$, а для другой $x''_1 = a + \varepsilon$, где величина ε очень мала. Тогда можно проверить $|x'_2 - x''_2| = 2\varepsilon$, $|x'_3 - x''_3| = 4\varepsilon$, ..., $|x'_n - x''_n| = 2^{n-1}\varepsilon$.

Другими словами, с каждым шагом расстояние между траекториями $|x'_n - x''_n|$ увеличивается вдвое. И когда $\varepsilon \cdot 2^N \approx 1$, то, зная последовательность $\{x'_n\}$, мы ничего не можем сказать о поведении $\{x''_n\}$. Представим теперь, что $\{x'_n\}$ определяет динамику исследуемого объекта, а $\{x''_n\}$ – описывающую его математическую модель. Тогда через $N > \log_2 \varepsilon^{-1}$ шагов мы теряем возможность следить за динамикой объекта (эту величину, после которой нельзя дать прогноз состояния объекта, исследуя его модель, и ученые вынуждены опираться только на статистику, называют *горизонтом прогноза*).

Это означает, что взмах крыльев бабочки (изменившей начальное состояние атмосферы на очень малую величину ε) может через некоторое время (для атмосферы горизонт прогноза – 2 недели) привести к разрушительному урагану за тысячи километров от нее. Важно взмахнуть в правильное время в правильном месте.

Изучение динамических систем с хаотическим поведением решений позволило дать новый, более глубокий ответ на вопрос о глобальном прогнозе и свободе воли.

Лаплас исходил из предпосылки, что можно бесконечно точно измерить состояние изучаемой системы ($\varepsilon = 0$). Это предположение нереалистично – точность измерений конечна ($\varepsilon > 0$). Типичной для моделей естествознания является *чувствительность к начальным данным*. Мы можем предсказывать состояние исследуемых объектов только до горизонта прогноза, а далее приходится обращаться к их статистическому, вероятностному описанию. Глобальный прогноз невозможен, каким бы быстродействием и памятью ни обладали используемые компьютеры. Наша реальность гораздо богаче и интереснее, и мы являемся ее творцами. Эффект бабочки показывает, что наши действия меняют очень многое в мире. Это дает новое понимание природы, общества и человека, позволяет осознать нашу меру ответственности за происходящее.

Следует обратить внимание на преемственность по отношению к общим математическим идеям. Когда создается и разрабатывается парадигма, то фрагменты предшествующих исследований и многие результаты укладываются в нее как элементы в головоломку. С другой стороны, появляются общие понятия, позволяющие увидеть единое во многом.

Лагранж и многие другие выдающиеся математики вложили большие усилия, чтобы доказать, что непрерывные функции являются дифференцируемыми почти всюду. Однако в течение многих десятилетий это кажущееся очевидным утверждение никак не удавалось доказать. Опровергнуть его удалось одному из создателей современного математического анализа Карлу Вейерштрассу. Он построил контрпример – непрерывную функцию, не являющуюся дифференцируемой ни в одной точке. Эта функция задается суммой некоторого ряда

$$W(x) = \sum_{n \geq 1} a^n \cos(b^n \pi x), \quad a < 1, \quad b > 1, \quad ab > 1$$

и удовлетворяет функциональному уравнению

$$f(x) - af(bx) = g(x),$$

где $g(x) = a \cos(b\pi x)$.

Так как $|a| < 1$, ряд мажорируется геометрической прогрессией и поэтому в соответствии с классическими терминами математического анализа сходится к непрерывной функции. Вейерштрассу удалось доказать, что при некоторых a и b функция $W(x)$ не имеет производной ни в одной точке отрезка $-\pi \leq x \leq \pi$.

После этой выдающейся работы ряд парадоксальных контрпримеров, «монстров», как их называли сами математики, начал стремительно расти.

Среди этих «монстров» *канторово множество* – в некоторых его вариантах оно может иметь конечную длину, но не содержать ни одного отрезка. *Остров Коха* – фигура на плоскости, имеющая конечную площадь и бесконечный периметр. *Дьявольская лестница* – непрерывная монотонная кривая, производная которой равна нулю почти всюду. *Губка Серпинского*, имеющая конечный объем и бесконечную площадь поверхности.

Все эти множества получаются в результате предельного перехода. Их отличительная черта – отсутствие выделенного характерного и пространственного масштаба – *масштабная инвариантность*. Всматриваясь в них со всё большим увеличением, мы каждый раз будем видеть примерно одну и ту же картину. Объекты, обладающие этим свойством, назвали *фракталами*. [7]

Принципиальная черта фракталов – масштабно-инвариантных объектов – состоит в *отсутствии характерных масштабов*. Это противоречит нашей интуиции, здравому смыслу и приводит к ряду глубоких, парадоксальных выводов, которые мы обсудим далее.

Большие проблемы и многие достижения науки XXI века связаны с развитием системного подхода. Если наука XIX века имела дело с отдель-

ными элементами, объектами, процессами, с анализом (дословно «расчленением», «разбиением»), то в XX веке в центре внимания ученых и инженеров оказались системы и связи между элементами, которые превращают множество частей в целое.

Известный специалист в области философии науки, академик В.С.Стёпин полагает, что синергетика – это, прежде всего, *теория саморазвивающихся систем* и что к ее основоположникам следует отнести Гегеля, поставившего ряд проблем, которые через полтора столетия были осознаны в естествознании и во многих гуманитарных дисциплинах. Во времена Гегеля еще не было дарвиновской теории биологической эволюции, и он обратился к анализу саморазвивающейся системы, которая была у него перед глазами, – культуры.

Поэтому третья парадигма синергетики – парадигма сложности, в большой степени была ориентирована на проблему, поставленную Гегелем – Как ведут себя саморазвивающиеся системы?

Становление третьей парадигмы во многом связано с возможностью прямого численного моделирования процессов эволюции. Иногда говорят о *многоагентных системах* или об *искусственной жизни*.

Здесь можно привести следующий характерный пример. Почему в обществе существует альтруизм? Этот фундаментальный вопрос задают себе социологи, этнографы, этологи, психологи. В соответствии с теорией Дарвина, эволюция стоит на трех китах – наследственности, изменчивости и естественном отборе. Альтруизм – готовность отдать часть своего жизненно важного ресурса ближнему. Однако это действие уменьшает вероятность выживания такого индивидуума. И если благодаря странной мутации таковые возникли, то уже через несколько поколений их не будет. С другой стороны, без альтруистов множество сообществ просто не выживает...

Чтобы ответить на вопрос о природе этого феномена, исследователи моделируют эволюцию. Каждой особи соответствует некоторая компьютерная программа-агент. Репертуар действий агентов достаточно велик. Они могут двигаться в различных направлениях, оценивать окружающую обстановку, есть, отдыхать, защищаться, нападать, размножаться, обучаться. Для генома таких созданий, как и для обычных биологических объектов, имеют место и наследственность, и изменчивость. Ограниченность ресурсов создает конкуренцию и приводит к естественному отбору. «Интеллект» агентов определяется некоторой нейронной сетью, которая может «обучаться» в ходе «жизнедеятельности» агента.

Например, в модели М.С.Бурцева [8], описывающей эволюцию, поведенческие стратегии вырабатываются в ходе саморазвития популяции. Происходит выбор из 2^{1000} стратегий. Самоорганизация здесь происходит не только в физическом пространстве и во времени, но и в пространствах стратегий и генотипов.

Естественно в ходе эволюции было ожидать появления «ястребов», стратегия которых связана с индивидуальным нападением и развитием необходимых для этого качеств, и жертв – «голубей». Однако одновременно с этим в популяции появились «вороны», ориентированные на коллективное нападение (название произошло от известной поговорки «Ворон ворону глаз не выклюет»), и «скворцы», предпринимающие коллективную защиту в случае опасности.

Численности «кланов» в популяции, придерживающихся различных поведенческих стратегий, испытывают резкие колебания и ни на какой регулярный режим не выходят. Однако не менее любопытным представляется еще одно важное обстоятельство. Со школьных времен мы привыкли к тому, что в задаче есть правильный ответ или несколько ответов, напечатанных в конце задачника. И здесь естественно было бы ожидать того же. Поэтому естественно предположить, что и вся развивающаяся популяция методом проб и ошибок «найдет» оптимальное соотношение «ястребов», «голубей», «воронов», «скворцов», которое далее меняться не будет.

Однако, как показывают модели искусственной жизни и, в частности, эта модель, в них после длительных периодов «квазиравновесия» могут происходить «революции» – проигрышные прежде стратегии оказываются выигрышными, и численность их обладателей быстро растет, а бывшие «фавориты» оказываются внизу. И здесь тоже можно вспомнить восточную поговорку: «Когда караван поворачивает назад, то хромой верблюд оказывается первым».

Следующий шаг синергетики тесно связан с развитием математической традиции, сложившейся в XX веке. Эту традицию условно можно назвать *геометризацией математического мышления*.

В частности, среди множества геометрий очень интересной оказалась *топология* (Анри Пуанкаре назвал этот раздел математики «анализом места», «геометрией положения»; позже за ним закрепилось название, происходящее от греческих слов – «топос» – место и «логос» – знание). В этой геометрии допускаются любые непрерывные (сохраняющие близость) преобразования. Ее можно сравнить с геометрией резинового листа, который можно растягивать, сжимать, деформировать любым образом, однако нельзя разрывать и склеивать.

Анри Пуанкаре полагал, что в будущем именно топология окажется в основе множества фундаментальных математических теорий. Двадцатый век подтвердил это предвидение выдающегося ученого.

Другой принципиальный пункт исследовательской программы Пуанкаре – *изучение бифуркаций*. Под бифуркациями понимают изменение числа и/или устойчивости решений определенного типа в изучаемых уравнениях.

С другой стороны, множество исследуемых сейчас нелинейных систем огромно, в то время как множество бифуркаций несравненно меньше. В самых разных системах возникают *одни и те же бифуркации*. За этим

скрывается огромное внутреннее единство нелинейного мира и возможность исследовать бифуркации, рассматривая простейшие системы, в которых они происходят.

СЕТЕВАЯ ПАРАДИГМА

Есть только один важный вопрос – что делать дальше.

Из фольклора

Каково будущее синергетики? Какие общие фундаментальные вопросы остались без ответа? Где семена, посеянные сегодня, из которых завтра вырастет лес новых идей, теорий, результатов?

По-видимому, и организации, и люди, и страны, да и всё человечество в целом было и будет находиться в треугольнике «знание–прогноз–управление».

Каковы основные рычаги руководителя? Большинство учебников управления выделяют пять – *ресурсы, финансы, кадры, организация, информация*. Основное направление технологического развития нашей цивилизации было связано с поиском новых ресурсов и повышением эффективности их использования. Отчасти этим и объясняется стремительное развитие естественных наук – физики, химии, биологии, с которыми связано создание этих ресурсов. Финансы, денежно-кредитная система были, прежде всего, инструментом для их наиболее эффективного распределения.

Однако, судя по всему, не в этих сферах лежат главные вызовы, с которыми столкнется человечество в XXI веке. Основные угрозы, риски и возможности будут связаны с человеком и обществом, с управлением социальными процессами, с организацией и самоорганизацией социальных, социально-технологических и других «человекомерных систем».

Напомним три важнейшие технологии XXI века, выделенные С.П.Курдюмовым, – *проектирование будущего, высокие гуманитарные технологии, алгоритмы сборки и разрушения социальных субъектов*. Несмотря на развитие математической психологии, теоретической географии, математической социологии, наконец, математической истории (которая изначально строилась на основе представлений синергетики) [10] их выводы и результаты не сравнимы с тем, что дают естественные науки для описания, понимания и предсказания свойств своих объектов.

По-видимому, здесь лежит огромное поле деятельности для междисциплинарных подходов. Достаточно понятна и научная стратегия ближайших десятилетий – идти от хорошо понятых систем и процессов в естествознании, учитывая минимальное количество новых сущностей, характерных для биологических или гуманитарных наук, к человеку и обществу, к человекомерным системам.

По-видимому, одной из таких сущностей являются *связи* – то, что характеризует взаимодействие элементов, входящих в систему, что делает из частей целое.

Совокупность этих связей будем называть *сетью*. Вполне возможно, что на следующем этапе развития синергетики в центре внимания исследователей будет находиться *сетевая парадигма*. Тот фундаментальный вопрос, который предстоит разрешить сегодня, можно сформулировать так: «Как выращивать сетевые структуры? Как их использовать и управлять ими?»

Ряд приложений этих исследований очевиден уже сегодня. Само общество пронизано сетевыми структурами. Казалось бы, понимание их роли и механизмов функционирования должна была бы дать развивающаяся не первый век социология. Однако феномен флэш-мобов, оранжевые революции, эффективные действия сетевых структур, способных быстро парализовать огромный государственный аппарат и могущественные ведомства, показывают, что практика здесь очень сильно обогнала теорию. Необходимо быстро и масштабно исследовать, осмыслить и понять новые возможности и угрозы сетевой эпохи, в которую вступило человечество.

Расстояния оказались несущественными. Электронные коммуникации сделали связь мгновенной. Из всех геометрий самой важной действительно оказалась топология и те ее разделы, которые связаны с геометрией возникающих в компьютерных сетях графов связей. И здесь появляются ограничения другого рода – *когнитивные пределы*, связанные с объемом информации, который человек может эффективно осваивать и использовать, с количеством сотрудников и адресатов, с которыми он может взаимодействовать, с организацией работы в сетях.

Мир уже пережил взлет «новой экономики» в 1990-х годах и ее кризис в 2000-х. В основе «новой экономики» лежит интернет, информационно-телекоммуникационный комплекс. Экономика стала гораздо более «быстрой», рефлексивной и нестабильной, чем прежде. Последствия экономических кризисов для многих стран уже оказываются сравнимы с результатами крупных военных конфликтов. Закономерности «сетевой экономики» всё в большей мере начинают определять настоящее и будущее всего мирового хозяйства. Сегодня трудно представить предпринимательство без электронных денег и электронной подписи.

Высокие технологии оказываются всё теснее связанными с сетевыми структурами. Имеет место довольно очевидная закономерность – то, что в начале апробируется в ходе решения задач национальной обороны или при реализации крупных научно-технических проектов, спустя некоторое время, иногда через десятилетия, переходит в сферу высоких технологий, ориентированных на товары и услуги массового потребления.

В прикладной математике произошла «тихая революция», связанная с организацией коллективной работы сети компьютеров над одной сложной

задачей. Впечатляет сетевой проект, в котором приняли участие миллионы компьютеров – поиск лекарства против рака. Желающих участвовать в проекте снабдили математическими моделями, позволяющими тестировать воздействие различных веществ на развитие клетки на разных стадиях жизненного цикла.

Сотовая связь – пример того, как сетевые структуры уже изменили нашу реальность.

Вся история военного дела представляет собой совершенствование коллективных действий боевых единиц. По-видимому, будущее за «безлюдными войнами», за «стаями» и «командами» роботов.

Попробуем рассмотреть простейшие физические процессы. Во многих пористых материалах, в отличие от регулярной периодической структуры, существуют поры различных размеров. Естественно характеризовать их с помощью распределения вероятностей этих пор по их радиусу. В ряде случаев можно предполагать, что мы имеем дело с масштабно-инвариантным объектом (например, таким, как губка Серпинского), с фракталами.

Анализ кинетики, диффузии, процессов переноса на фракталах, которым в последние десятилетия уделялось большое внимание, привел к замечательным результатам. Обратим внимание только на некоторые из них.

Одним из основополагающих утверждений химической кинетики является закон действующих масс для реакций в газовой фазе. Если в системе идет реакция, в которой в результате взаимодействия молекул вещества X с молекулами вещества Y получится вещество Z , то изменение z (концентрация вещества Z) зависит от концентраций x и y по закону

$$\frac{dz}{dt} = k \cdot xy.$$

Вспомним, что концентрация x – это вероятность найти молекулу X в единице объема. Реакция возникает, когда молекулы встречаются друг с другом и выписанное выше соотношение – это просто перемножение вероятностей независимых событий.

Однако если реакция происходит в пористом веществе, имеющем фрактальную структуру, то зависимость оказывается иной

$$\frac{dz}{dt} = k \cdot xy \cdot t^\alpha, \quad \alpha < 1,$$

где показатель α связан с геометрическими свойствами фрактала.

Для случайного блуждания частицы в обычной среде имеет место соотношение Эйнштейна

$$\langle \xi^2 \rangle = 2Dt,$$

где $\langle \xi^2 \rangle$ – среднеквадратичное смещение частицы, D – коэффициент диффузии. Зависимость от времени линейна.

Во фрактальной среде

$$\langle \xi^2 \rangle = \sigma^2 t^\alpha, \quad \alpha < 1,$$

где показатель α зависит от фрактальной размерности сети каналов и твердого остова. Понятно, почему диффузия в этом случае протекает медленнее, чем в обычной сплошной среде – частицам приходится двигаться по узким каналам с поворотами, тупиками, сужениями.

Возникает естественный соблазн описывать диффузию, перенос, другие процессы во фрактальных средах, опираясь, тем не менее, на потенциал методов математической физики. Однако это требует обобщения понятий производной и интеграла на нецелые показатели.

Ключевой шаг в этом направлении был сделан Леонардом Эйлером, обобщившим факториал $n! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot n$. Этим обобщением стала гамма-функция Эйлера:

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt \quad (\operatorname{Re} z > 0).$$

Эта функция такова, что $\Gamma(1) = 1$, $\Gamma(n+1) = n!$ отсюда виден путь к нецелым производным. В самом деле, n раз интегрируя по частям, имеем

$$\int_a^x \frac{(x-t)^{n-1}}{(n-1)!} u^n(t) dt = u(x).$$

Здесь $u^n(t)$ – n -я производная функции u . Но тогда производную порядка β функции $u^\beta(t)$ естественно было бы определить, используя равенство

$$\int_a^x \frac{(x-t)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} u^\beta(t) dt = u(x).$$

Точно так же можно было бы действовать в случае интеграла

$$\int_a^x dx \int_a^x dx \dots \int_a^x \varphi(x) dx = \frac{1}{(n-1)!} \int_a^x (x-t)^{n-1} \varphi(t) dt,$$

где $\Phi^\beta(\varphi) = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_a^x (x-t)^{\beta-1} \varphi(t) dt$

является дробным обобщением обычного интеграла.

Существуют и другие пути обобщения этих основных конструкций математического анализа. Однако до последних десятилетий не было прикладных задач, в которых эти обобщения имели бы глубокий смысл.

С развитием теории фракталов такие приложения появились, и начала стремительно развиваться «математическая физика с дробными производными» [11]. Например, вместо классического уравнения диффузии

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \Delta u$$

во фрактальной среде диффузия описывается уравнением с дробной производной по времени

$$\frac{\partial^\beta u}{\partial t^\beta} = \Delta u .$$

Оказалось, что схожие уравнения гораздо лучше описывают, к примеру, распространение эпидемии по сетевым структурам, имеющим фрактальный характер.

Подводя итог, можно сказать, что простейшие физические процессы, рассматриваемые на фрактальных структурах, описывают интересные физические эффекты и требуют необычной математики.

Однако еще более удивительными представляются процессы самоорганизации в более крупных и масштабных системах. Пожалуй, здесь тоже можно обратиться к одному из «вечных вопросов» науки – о роли катастроф в истории.

Одним из основополагающих законов геофизики был установлен Рихтером и Гутенбергом. В соответствии с ним

$$N(E) \approx E^{-\beta} ,$$

где E – энергия землетрясения, N – число землетрясений с энергией, большей E , β – коэффициент порядка 1. В этом законе принципиально важно отсутствие выделенного масштаба.

Наша интуиция «настроена» на существование таких масштабов в окружающем нас мире. Физиологи, психологи, антропологи утверждают, что физические, интеллектуальные и иные характеристики людей прекрасно описываются гауссовой кривой

$$\rho(x) \approx e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}} ,$$

где $\rho(x)$ – плотность вероятности распределения какого-либо признака в популяции (например, роста), M – среднее значение, σ^2 – дисперсия. Житейская мудрость, соответствующая этому выражению, – «Чудес не бывает».

Поскольку рост распределен таким образом, а функция $\rho(x)$ убывает очень быстро (за 3σ выходят не более 0,3% случаев), то мы с легким сердцем можем пренебречь вероятностью встречи как с 2,5-метровым гигантом, так и 30-сантиметровым карликом. Очевидно, здесь есть характерный размер объекта – M и характерная мера среднего отклонения от него – σ .

Но так бывает далеко не всегда. Оказалось, во многих случаях в открытых нелинейных системах происходят *масштабно-инвариантные процессы*, не имеющие собственных характерных значений. Их статистическим выражением являются степенные распределения вероятности вида

$$\rho(x) \approx x^{-(1+\alpha)}.$$

Именно они типичны для фракталов.

Область применения такого статистического описания ограничивается размером рассматриваемой системы L и размерами ее элементов. И тут «отрезать хвосты» распределения, которые содержат гигантские катастрофические события, уже нельзя. Из-за медленного убывания плотности $\rho(x)$ крупные события оказываются недостаточно редкими, чтобы их вероятностью можно было бы пренебречь. При $\alpha \leq 2$ для приведенного степенного распределения бесконечна дисперсия, а при $\alpha \leq 1$ бесконечным становится и само математическое ожидание. В этом случае сумма значений случайной величины в некоторой выборке становится сравнима с наибольшим значением в ней. Поэтому обе характеристики быстро и неограниченно увеличиваются по мере роста объема выборки (например, со временем).

Оказалось, что в области природных и техногенных катастроф статистика в большом интервале масштабов (так же, как в реальных фракталах) описывается степенными зависимостями. Характерны они и для многих социальных систем. Таковы землетрясения, наводнения, лесные пожары, биржевые крахи, ущерб от утечки конфиденциальной информации, число раненых и погибших в результате аварий на производстве, ущерб от аварий на атомных электростанциях.

С чем связаны такие степенные распределения и антиинтуитивное поведение подобных объектов? Простейшее объяснение является «сетевым».

В самом деле, привычное для нас гауссово распределение, как показывается в курсах теории вероятностей, возникает в центральной предельной теореме. Согласно ей распределение суммы N одинаково распределенных независимых случайных величин с конечными математическим ожиданием и дисперсией после соответствующей нормировки стремится при $N \rightarrow \infty$ к гауссовой кривой [12].

Однако если случайные величины *зависимы*, то всё может обстоять совершенно иначе. Представим себе энергетическую систему. Выход из строя одной электростанции приводят к тому, что остальные объекты начинают работать в более напряженном режиме, их вероятность выйти из строя увеличивается. Возникает «эффект домино» или цепная реакция отключений. Качественные соображения представляются достаточно очевидными, однако более глубокое понимание требует построения и исследования математических моделей, демонстрирующих схожую динамику.

Заметим, что построение распределения вероятности, имеющего степенную асимптотику, требует выборки очень большого объема, доступных, как правило, только в вычислительном эксперименте. Поэтому для анализа данных используют зависимости ранг–размер [13].

Эти зависимости в случае степенных распределений также имеют степенной вид

$$x(r) \approx r^{-1/\alpha}.$$

Такие зависимости строятся следующим образом: все элементы выборки упорядочиваются в порядке убывания и нумеруются. Самому большому элементу присваивается величина r_0 (это число, называемое величиной *рангового искажения* – выступает в качестве удобного подгоночного параметра и учитывает нестепенное поведение плотности вероятности при очень больших значениях величины x). Второму элементу – $r_0 + 1$, третьему – $r_0 + 2$. Ранг r – номер элемента в построенной таким образом выборке. При этом если для плотности вероятности наибольшие значения находятся «на хвосте», то для зависимости ранг–размер, наоборот, – в начале r_0 , $r_0 + 1, \dots$. Реальные данные по статистике катастроф очень хорошо ложатся на прямые [14].

Принципиальный шаг в понимании, моделировании и описании таких систем был сделан датским ученым, много лет работавшим в Америке, Пером Баком (1948-2002) [15].

В качестве концептуальной модели для описания катастрофической динамики он выбрал кучу песка, положенную на чашку весов. Сверху на чашку случайным образом бросают песчинку. Она может остаться в куче, может скатиться вниз, может толкнуть еще одну песчинку и вместе с ней упасть с чашки, а может вызвать и лавину осыпаний, в результате которой с чашки осыплется довольно много песка.

Вероятность этих событий зависит от того, насколько крутой является куча. Если она пологая, то больших лавин будет мало, и крутизна кучи будет расти. Если куча крутая, то, напротив, больших лавин будет больше и крутизна будет уменьшаться.

В результате крутизна, определяющая статистику лавин, будет стремиться к тому значению, *при котором возможны лавины любого масштаба*. Отсюда и масштабная инвариантность катастрофического поведения, и степенные зависимости.

Для описания такой динамики П.Бак, Ч.Танг и К.Визенфельд (БТВ) предложили модель, представляющую клеточный автомат. Модель БТВ задается на двумерной ортогональной решетке размера $L \times L$, в клетках которой записаны целые числа (которым может соответствовать локальный наклон или, в других интерпретациях, число песчинок). Любая ячейка, в которой 4 и более песчинок, считается неустойчивой и *опрокидывается*, раздавая 4 песчинки соседним клеткам, имеющим с ней общую сторону (если ячейка находится на краю, то песчинки, передаваемые за него, теряются).

Шаг моделирования начинается с добавления песчинки в случайно выбранную ячейку. Расчет продолжается до тех пор, пока все ячейки не приобретут устойчивость.

Другие правила раздачи песчинок определяют другие модели. Так, например, в модели Манны 4 песчинки раздаются соседкам случайным образом с вероятностями p_1, p_2, p_3, p_4 , $\sum_{i=1}^4 p_i = 1$. Правила модели БТВ изотропны строго, модели Манны – только в среднем.

Что означает «понимание» для моделей такого типа? Это понимание связано с возможностью, не проводя численных расчетов, на основании теоретических рассуждений установить коэффициент α и зависимость $u(x)$ от L .

Во многих случаях величина события x и вероятность того, что оно произошло $u(x)$, степенным образом зависят от L

$$x = aL^\gamma, u(x) = 1/bL^\beta.$$

Лавину можно характеризовать следующими параметрами – площадью S (число ячеек, хотя бы раз потерявших устойчивость), размер N (число опрокидываний, включая повторные опрокидывания одних и тех же ячеек) и периметр C (число ячеек, получивших песчинки, но сохранивших устойчивость, плюс число песчинок, упавших за край), T – число тактов, в течение которых продолжается лавина.

Замечательный результат, полученный сотрудником ИПМ А.В.Подлазовым [16], связан с полным аналитическим решением модели Манны и объяснением отличия количественных показателей, характеризующих эти модели. Для модели БТВ показатели для площади, размера, периметра и времени предположительно равны, соответственно,

$$\alpha_N = 5/24, \alpha_P = 5/24, \alpha_C = 1/3, \alpha_T = 1/3.$$

Для модели Манны

$$\alpha_N = 3/11, \alpha_P = 3/8, \alpha_C = 3/5, \alpha_T = 1/2.$$

По-видимому, можно говорить о *динамических симметриях*, определяющих статистику лавин.

Теория, две базовые модели которой рассматривались выше, была названа Пером Бакком *теорией самоорганизованной критичности*. Название подчеркивает, что рассматриваемая система спонтанно, самопроизвольно *самоорганизуется в критическое состояние*, в котором ее динамика приобретает масштабную инвариантность. Этой теории, начало которой было положено в 1988 году, в настоящее время посвящено более 17 тыс. работ, упоминаемых в интернете.

Популярность этой теории связана с тем, что она дает новое измерение естествознанию. В значительной степени она возрождает идеи катастрофизма Жоржа Кювье, высказанные в начале XIX века. Если раньше гигантские вымирания объясняли экзогенными событиями (падениями гигантских метеоритов, глобальными климатическими изменениями), то сейчас на них можно взглянуть иначе. В самом деле, отношения хищничества, паразитизма или симбиоза в биосфере создают гигантскую сеть взаимосвязей. Существенное, значимое развитие возможностей одного вида, произошедшее благодаря закреплению последствий случайных мутаций, немедленно скажется на многих других связанных с ним видах. Оно может изменить их положение в пищевых цепочках и потребовать ответных реакций. Таким образом может начаться лавина изменений, связанных не с внешними (экзогенными), а с внутренними (эндогенными) факторами.

Многие проблемы, связанные с сетевыми структурами, уже ставились и на определенном уровне решались в последние 60 лет. Это делалось в теории нейронных сетей.

В самом деле, после выдающегося открытия испанского ученого С.Рамон-и-Кахаля (Нобелевская премия по биологии и медицине 1906 г.), установившего, что мозг состоит из нервных клеток – нейронов, огромные усилия были вложены в изучение этих объектов. Результаты разочаровали ученых – клетка оказалась достаточно простой и во многом похожей на другие клетки. Но тогда откуда же берется такое чудо, как сознание?

Традиционная логика, которой следует большинство исследователей в этой области, такова. Если каждый элемент не обладает свойствами, которые мы связываем с сознанием, а ансамбль таких элементов обладает, то дело, вероятно, в коллективном взаимодействии, в той сети нейронов, которая складывается в результате самоорганизации. Этот подход получил название «коннекционизм» (от английского to connect – связывать). Иными словами, «полцарства за связи» и за механизмы их возникновения.

В теории нейронных сетей элементарные представления о динамике нейронов и алгоритмах обучения получили воплощение в конкретных математических моделях. [17] Одна из простейших моделей, демонстрирую-

щих феномен ассоциативной памяти, была предложена Дж.Дж.Хопфилдом. Эта модель представляет собой сеть нейронов, в которой каждый нейрон связан с каждым. Нейрон задается некоторой динамической системой с дискретным $n = 1, 2, \dots$ или непрерывным временем $0 \leq t < \infty$.

$$S_{n+1}^i = f(S_n^i, h_n^i), \quad i = 1, \dots, N,$$

где i – номер нейрона, величина h_n описывает воздействие на данный нейрон остальных:

$$h_n^i = \sum_{j=1}^N \rho_{ij} S_n^i S_n^j,$$

где N – число нейронов, ρ_{ij} – веса связей. В модели Хопфилда связи симметричны $\rho_{ij} = \rho_{ji}$, и нейрон не учитывает своего предыдущего состояния $\rho_{ii} = 0, 1 \leq i \leq N$.

Простейший нейрон был предложен У.Мак-Каллоком и В.Питсом:

$$S_{n+1} = 1, \text{ если } h > 0; \quad S_{n+1}^i = -1, \text{ если } h < 0.$$

Чтобы организовать ассоциативную память, Д.О.Хебб высказал простую идею. Чем для большего числа образов, которые следует запомнить, нейроны находятся в одинаковом состоянии, тем большим положительным должен быть вес ρ_{ij} . Чем чаще эти нейроны оказываются в противофазе, тем меньшим отрицательным значением должны быть значения ρ_{ij} .

Возможность «подстраивать» веса связей в нейронной сети позволяет решать замечательный класс задач, связанный с распознаванием образов и ассоциативной памятью.

Однако развитие «сетевых исследований» и возможных механизмов самоорганизации в сетевых структурах может и здесь дать новый импульс.

В самом деле, теория нейронных сетей дает ответ на скромный вопрос: «Как могли бы быть устроены системы, демонстрирующие часть функций, присущих сознанию, и с помощью каких простейших моделей это может быть показано?» Однако в ближайшем будущем ситуация может кардинально измениться. В современной науке большую роль играют «большие проекты», использующие новые поколения технологий научных исследований. Это и Большой адронный коллайдер, и Международная космическая станция, и телескопы и «Хаббл» и «Кеплер», и проект «Геном человека».

В настоящее время в теории биологических нейронных сетей (и в IV парадигме синергетики) появился свой большой проект – «Коннектом». Его цель – картирование нейронных сетей, существующих в мозге, наибо-

лее важных связей, активности мозга в его динамике. Важнейшими элементами таких исследований становятся компьютерные системы, позволяющие обрабатывать эту информацию.

Второе направление прорыва связано с новыми технологическими возможностями. Ахиллесовой пятой нейронных сетей является их аппаратная реализация. В самом деле, важнейшим достоинством нейронных сетей является очень высокая параллельность вычислительных процессов, осуществляемых с их помощью, – все нейроны работают одновременно. Однако для того, чтобы это преимущество в полной мере было использовано, соответствующая нейросетевая архитектура должна быть реализована на аппаратном уровне, а это $\sim N^2$ связей при N нейронах.

Концептуальное решение этой проблемы предложил более 30 лет назад американский специалист по нелинейной динамике Леон Чуа. Из школьного курса нам известны три типа простейших элементов электрических схем – сопротивления (резисторы), емкости (конденсаторы) и индуктивности (катушки). Л. Чуа предположил, что может существовать в электронике еще один элементарный объект – *мемристор* – переменное сопротивление, величина которого зависит от заряда, который протек через него.

Это в точности то, что надо для аппаратной реализации нейросетей. Если предположить, что i -й и j -й нейрон почти всегда находятся в одинаковом состоянии, то и ток между ними невелик и сопротивление, например, оказывается малым. Если, напротив, обычно нейроны выступают в противофазе, то и заряд, проходящий через соединяющий их проводник, окажется большим со всеми вытекающими последствиями.

Это изобретение (практическое воплощение мемристоров стало возможно благодаря нанотехнологиям) может кардинально расширить область приложения систем искусственного интеллекта. Возможность иметь огромное количество дешевых, самообучающихся, эффективных роботов может в считанные годы преобразить военную сферу (беспилотные летательные аппараты, способные к коллективным действиям, соответствующие системы на воде, под водой, в космосе...), производство, быт. Возможно, этот класс сетевых технологий подводит нас к порогу новой научно-технической революции.

КОГНИТИВНЫЙ ИМПЕРАТИВ И СЕТЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

В рамках фундаментальных теорий или парадигм синергетики, как правило, возникали не только новые возможности, но и выявлялись принципиальные ограничения. По-видимому, это уже произошло в сетевой парадигме синергетики.

В 1960-х годах в хоре радужных прогнозов развития науки потонули голоса науковедов, предсказывавших близкий конец эпохи количественного

роста. Последние обращали внимание на то, что если N – число ученых в обществе, то затраты на поддержание этого научного сообщества пропорциональны N^2 , а прирост научного знания – \sqrt{N} . Прокомментируем обе зависимости.

Наука – это диалог, предприятие, требующее коллективных усилий. Число возможных контактов, расходы на осуществление коммуникаций, поддержание всей научной инфраструктуры, растет с N не линейно, а квадратично.

Намного более медленный, по сравнению с численностью ученых, прирост научного знания обусловлен двумя факторами. Всё большая часть сообщества ученых нужна, чтобы «удерживать территорию» – тот уровень знаний, технологий, образования, которые уже детально разработаны и в которых трудно ожидать прорывов. Расширение фронта исследований приводит к тому, что уже нельзя «заниматься всем» даже в крупных и успешных странах. Приходится достаточно жестко выбирать и, конечно, что-то важное упускается. Наконец, в ряде направлений очень длинным становится сам путь к переднему краю науки, и всё меньше людей хочет и может его проходить. Иными словами, мы приближаемся к *когнитивным пределам* – к границам возможностей отдельных людей или общества в целом познавать, осваивать и поддерживать уже изученное и использовать полученные знания [18].

С когнитивными ограничениями и сетевыми структурами оказалось непосредственно связано развитие «инновационной экономики», или «экономики знаний».

Развитие телекоммуникаций, повсеместное внедрение интернета позволило организовать интернет-торговлю, виртуальные компании, лаборатории и институты, онлайн-игры, в которые могут играть десятки миллионов человек. Это дало новый импульс американской экономике. В период бума интернет-компаний их капитализацию Q считали пропорциональной N^2 , где N – число узлов в соответствующей сети. Неявно считалось, что «каждый связывается с каждым» с некоторой, пусть даже небольшой, но постоянной вероятностью.

Когда в 2000-х годах пузырь интернет-экономики лопнул, и пришла пора подводить итоги, то закон оказался совсем другим $Q \approx N \ln N$. Структура связей оказалась весьма своеобразной. Большинство узлов связывается с несколькими ведущими элементами (хабами), а те уже активно взаимодействуют между собой. При этом дело оказывается не в технической реализации, а в возможностях людей активно взаимодействовать с другими, анализировать информацию, осмысливать и использовать полученные данные – в *когнитивных пределах*. По-видимому, с точки зрения развития общества, экономики, техники начавшегося века, эти пределы окажутся не менее существенными, чем те, которые следуют из физических теорий. [19]

В чем состоит главный ресурс при работе вблизи подобных «сетевых пределов»? Во-первых, в том, чтобы устанавливать «правильные», наиболее ценные и эффективные связи, а также в том, чтобы «адекватным», «умным», «дальновидным» оказывался каждый из узлов сети. Первая задача связана с описанием, пониманием и использованием самоорганизации в пространстве связей. Вторая, которую можно применять в системах управления, – с созданием и работой *когнитивных центров*. [18]

В 1970-х огромный эффект в управлении сложными, большими организационными структурами дали так называемые *ситуационные центры*. В последних информация о состоянии управляемого объекта представлялась лицам, принимающим решения, их советникам и экспертам в наиболее ясном, простом и наглядном виде. Кроме того, будучи собраны в одном зале, все «действующие лица» получали отличную возможность для проведения «мозговых штурмов», «консилиумов», консультаций, для быстрой и «прозрачной» выработки управленческих решений.

Однако объекты управления в XXI веке стали сложнее, и это потребовало новых инструментов. В дополнение к возможностям ситуационного центра в когнитивном центре существует одна или несколько *систем математических моделей*, описывающих объект управления. Они позволяют предсказать наиболее вероятные последствия принимаемых решений, а значит, скорректировать и сами решения. Кроме того, в последние десятилетия появились *алгоритмы, позволяющие работать с большими информационными потоками* и выявлять из приходящей информации предвестники кризисных, чрезвычайных ситуаций. Например, использование таких инструментов для обеспечения работы полиции Нью-Йорка позволило в течение десятилетия уменьшить преступность в городе на 80%, а число угонов машин сократить на 95%.

Наконец, во многих сложных ситуациях экспертов, сидящих в центре за столом, оказывается недостаточно. Надо привлекать ведущих специалистов, которые могут находиться в тысячах километров от происходящих событий. Современные телекоммуникации дают для этого возможности, а когнитивный центр обеспечивает и поддерживает такой режим работы.

Когнитивные науки рассматривают процесс познания в его различных аспектах. И в этом смысле работа по управлению в условиях быстрых изменений во многом приобретает ряд характерных черт научной деятельности. И главная среди них – выявление наиболее важного и существенного в приходящей информации, выделение параметров порядка в информационном потоке. Ряд таких технологий, называемых *когнитивными*, также используется в подобных центрах. Многие из них пришли из медицины, где специалисты сталкиваются со схожими задачами. [20]

МИР СЕТЕВЫХ СОЦИАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Один из основоположников психоанализа Карл Густав Юнг (1875-1961) обратил внимание на удивительное различие мира природы и мира людей. С одной стороны, он ввел понятие «коллективного бессознательного» (общей памяти всего человеческого рода, в значительной степени универсального и отражающегося в сказках, мифах, легендах, фольклоре). С другой стороны, он обратил внимание на *синхронистичность* – удивительные совпадения, характерные для мира людей.

Одно из количественных выражений парадоксальности мира людей было открыто в 1960-х годах известным социологом С.Милгрэмом (1933-1984) и получило название «Закона шести рукопожатий» или «феномена малых миров». Если люди лично знакомы друг с другом, то будем говорить, что они связаны рукопожатием. Проведенное исследование показало, что в той части общества, которую изучал социолог, люди связаны друг с другом через 6 рукопожатий. Возникла гипотеза о том, что человечество в целом устроено таким же образом. Позже были получены веские подтверждения в пользу этого предположения.

Сама по себе идея малых миров представляется поразительной. Нынешнему человечеству можно сопоставить граф, который содержит 7 млрд вершин. Число ребер, соответствующих знакомствам, у каждой вершины невелико – наши способности к общению также весьма ограничены. Вместе с тем эти связи распределены таким образом, что в конце концов мы оказываемся обитателями «малого мира» с удивительной топологией. Социальное и информационное пространство кардинально отличается от физического.

В настоящее время всё более важную роль в общественной активности, в политике, в образовании и экономике, в сфере национальной безопасности и криминальном мире начинают играть *социальные сети*. Теория таких сетей находится в начале своего развития. Поэтому весьма ценными оказываются «экспериментальные факты», касающиеся таких объектов. Важная и интересная работа в этой связи была выполнена в ИПМ РАН в 2012 году А.В. Подлазовым и другими сотрудниками института, изучавшими Живой журнал (ЖЖ) [21]. Граф этой социальной сети содержит примерно 7,8 млн вершин и 284 млн ребер, которые соответствуют направленным и взаимным связям.

Можно предположить, что в одних отношениях этот «виртуальный мир» является отражением общества, обладающим теми же свойствами, а в других – совершенно иным объектом. И действительно, оказалось, что для ЖЖ справедлив с весьма высокой точностью «закон шести рукопожатий».

Вместе с тем в настоящее время было выяснено, что во многих случаях структура исследуемых объектов соответствует так называемым *безмас-*

штабным сетям, для которых функция распределения вершин по числу входящих в них ребер определяется степенной зависимостью

$$u(k) \sim k^{-(1+\alpha)}.$$

Психология утверждает, что человек может активно, творчески, содержательно общаться только с 5-7 людьми. Он может следить лишь за 5-7 медленно меняющимися во времени величинами. Принимая решение, он может учесть лишь 5-7 факторов. Но это в обычном мире.

В виртуальной реальности всё обстоит несколько иначе. Достаточно большой процент людей в ЖЖ имеют десятки или сотни знакомых. Видимо, имеет место своеобразное «соотношение неопределенности» – «широта» общения достигается за счет глубины. Именно в этой области находится большинство вершин. Вероятно, очень многим транслируется одна и та же общая информация.

Однако есть «рекордсмены», которые имеют до 2000 взаимных связей – «лидеры сети». И именно на них и приходится основное число связей. Живой журнал и, вероятно, другие социальные сети обладают еще многими интересными свойствами, которые показывают с новой стороны и структуру общества, и закономерности распределения информации, и возможности управления сетями.

Очень интересны механизмы и закономерности роста, развития, самоорганизации сетей, динамика, которая порождает удивительную статистику. Это огромное поле деятельности для специалистов по моделированию, социологии, социальной психологии, компьютерным наукам – для всех, кто будет развивать IV парадигму синергетики.

КРИЗИС ВЫЧИСЛЕНИЙ

Король умер.
Да здравствует король!

В 1960-х годах один из основателей мирового компьютерного гиганта Intel Гордон Мур анализировал развитие компьютерной индустрии. Проведенная экстраполяция позволила сформулировать утверждение, получившее название *первого закона Мура*. В соответствии с ним плотность размещения элементов на кристалле удваивается каждые два года. Отсюда следует, что быстродействие вычислительных машин растет в той же геометрической прогрессии. *Второй закон Мура* гласил, что рано или поздно первый закон Мура перестанет действовать и наступит новая компьютерная эпоха.

Первый закон Мура исправно действует и поныне. Быстродействие современных суперкомпьютеров в 250 млрд раз превосходит скорость пер-

вых образцов вычислительной техники. Ни одна из созданных человечеством технологий не знала таких темпов роста.

Однако стоит подумать и о следующей компьютерной эпохе, когда мы в полной мере ощутим действие второго закона Мура. Именно в эту новую эпоху сетевая парадигма синергетики и может сыграть принципиальную роль.

В самом деле, микросхемы всё ближе подбираются к своим физическим пределам. Важнейшая характеристика микросхемы – толщина линии – определяет минимальный размер структуры, который позволяют создать на кристалле используемые технологии. Мировые компьютерные гиганты говорят о выходе на рубеже 20 нм (1 нм – нанометр – 10^{-9} м). Однако постоянная кристаллической решетки кремния определяет предельную толщину линии – 1 нм. Мы уже очень близки к пределам.

Но это означает, что уже видны границы отдельного процессора. И дальнейшее совершенствование будет, вероятно, связано с объединением этих процессоров в сети, со способами решать большие задачи, а также с алгоритмами, позволяющими эффективно использовать целое и не заставляющими ждать друг друга различные части системы. Видимо, это очевидное направление экстраполяции развития вычислительных систем и станет популярным в ближайшие годы. Хочется думать, что сетевые технологии помогут преодолеть «аппаратный кризис» вычислительной техники, которые уже не за горами.

Однако вполне возможно, что гораздо раньше этого момента в полный рост встанут более серьезные проблемы, связанные с использованием компьютеров.

Нынешние промышленные технологии программирования в среднем позволяют обеспечить примерно 1 ошибку на 1000 строк кода. Это очень высокий уровень, результат больших вложенных усилий. Обеспечить намного более высокую точность программирования не удастся. И это имеет много далеко идущих последствий.

Наличие этих ошибок – источник уязвимостей, дыр, поиск и «латание» которых дает хлеб сотням тысяч программистов. Однако эти дыры создают возможность для проникновения вирусов, «троянов», «компьютерных червей», являются источником больших проблем для многих пользователей.

Это ставит крест на многих проектах. Одна из причин, по которым не была в свое время реализована выдвинутая Рональдом Рейганом стратегическая оборонная инициатива, программа «звездных войн», состоит в невозможности эффективно спроектировать и надежно отладить огромный программный комплекс, необходимый для такой системы противоракетной обороны (его «стоимость» в то время оценивалась в миллион человеко-лет работы квалифицированных программистов).

Робототехника сейчас позволяет роботам технически осуществлять достаточно сложные медицинские операции. Но что будет, если в ответственный момент компьютер, управляющий роботом, «зависнет»? Известно несколько случаев, когда ошибки медицинских программ стоили жизни десяткам пациентов...

Результаты компьютерных ошибок уже привели к потере ряда космических аппаратов Россией и другими странами...

Отдельная большая тема – компьютерные преступления. Криминальный мир использует компьютерные системы и, в частности, сети крайне эффективно...

Мы оказались в парадоксальной ситуации – управлять многими социально-технологическими и оборонными системами без развитой компьютерной инфраструктуры сегодня невозможно. Но и делать это весьма опасно. И следует отдавать себе отчет в том, что нам пока очень везет.

Стратегические риски возникают не только в ходе использования программ с неизбежными ошибками, не только в результате атак на используемые компьютерные системы, но и в ходе взаимодействия «человек – программа». И меры следовало бы принимать сейчас, пока масштабные «компьютерные катастрофы» не убедили бы экспертов и общественное мнение в важности этой проблемы. В жизненной важности.

Какой толк в суперкомпьютерах и гигантской скорости вычислений, если не удастся достаточно надежно строить программы, да и вообще использовать эти возможности во многих ответственных ситуациях?

Путей здесь открывается несколько. Сверхнадежное (а значит, и сверхдорогое) программирование и новое поколение систем, ищущих ошибки. Осознание и использование знания о пределах, в которых компьютерные системы могут применяться, с учетом тех стратегических рисков, на которые готово пойти человечество. Возможны упрощение и стандартизация программного обеспечения, используемого в действительно ответственных системах.

Развитие открытого программного обеспечения, привлечение широкого профессионального сообщества к совершенствованию ряда открытых программных продуктов (crowd sourcing) тоже могут быть в ряде случаев эффективным путем.

Таким образом, сетевые технологии, сетевая организация и самоорганизация могут оказаться главными способами преодолеть наметившейся вычислительный кризис и вступить в новую компьютерную эпоху.

СЕТЕВАЯ РЕАЛЬНОСТЬ И НОВЫЙ ОБЛИК СОЦИОЛОГИИ

Возникновение новых научных подходов и технологий часто порождает и неоправданные ожидания, и энтузиазм, и излишний оптимизм. В большой степени это происходит сейчас с сетевыми технологиями. Ряд

«оранжевых» революций, произошедших в ходе перереформирования «Большого Ближнего Востока», создают иллюзию, что недовольное большинство можно организовать с помощью простейших сетевых технологий через интернет, а затем, устроив несколько «флеш-мобов» с помощью мобильных телефонов, можно организовать демонстрации, привлечь сторонников и сместить существующий режим.

По-видимому, всё обстоит гораздо сложнее. Общество пронизано различными сетевыми социальными структурами – родственными, дружескими, финансовыми, криминальными, деловыми. И то, что видится «на поверхности» социальных опросов, политических заявлений, демонстраций, – лишь внешние проявления глубинных социальных сетей.

Поводом для смены режима действительно могут стать массовые выступления, демонстрации, беспорядки. Однако сама эта смена может произойти, когда «подрублены» основы, парализованы или ослаблены сетевые структуры, на которых «держались» предшествующая элита и режим, и сформированы новые сети, которые готовы прийти на смену старым.

По-видимому, осмыслением, анализом, моделированием и прогнозом этих явлений должна заниматься рождающаяся на наших глазах *сетевая социология*. В рамках этого подхода и процессы самоорганизации, и неустойчивости в социальных системах, появившиеся с появлением новых технологических возможностей, будут пониматься гораздо глубже, чем в настоящее время. Однако на несколько явлений в этой важной области можно обратить внимание уже сейчас.

Как показывают конец XX века и начало нового столетия, весьма серьезной является ситуация, в которой центральная, федеральная и местные, региональные элиты действуют несогласованно или в противофазе. В этой связи достаточно напомнить распад СССР.

Тревожным симптомом в этом плане оказались результаты и технологии выборов в Государственную Думу в 2011 году, которые неоднократно обсуждались интернет-сообществом. Анализ данных Центризбиркома показывает, что пока явка избирателей не превышала 50%, предпочтения избирателей, не зависели от процента явки, в то время как далее, с увеличением числа проголосовавших, поддержка «Единой России» линейно росла, а всех остальных партий, соответственно, падала.

Одной из главных «тем» прикладной математики XX века являлись обратные или некорректные задачи, в которых нужно восстановить свойства изучаемой системы по косвенным признакам, когда решение, получаемое стандартными методами, неустойчиво относительно входных параметров либо неединственно.

При этом очень существенна априорная информация, позволяющая выделить «источник», «наиболее вероятное», «наилучшее приближенное» решение из множества возможностей.

Если подходить так же к результатам выборов, то естественно предположить, что «истинная поддержка» населением различных политических сил проявляется на участках, где проголосовало менее 50%. Далее начинает действовать «административный ресурс», применяемый местными элитами. Интересы последних, возможно, связаны с тем, чтобы провести больше «своих людей» в депутаты или «угодить Центру».

Рассуждая подобным образом, можно восстановить наиболее вероятные политические предпочтения граждан России. Качественно они не отличаются от результатов выборов – порядок партий по доле проголосовавшего за них населения остается тем же. Однако количественные корректировки результатов оказываются весьма существенны.

При этом центральная власть и элита, как показали последовавшие за этим выборы Президента РФ в 2012 году, стремятся сейчас к максимально открытым, честным и легитимным выборам. Чтобы население страны могло в интернете наблюдать за ходом выборов, на *каждом* избирательном участке была развернута уникальная сетевая инфраструктура стоимостью более 25 млрд руб. (которую можно использовать во многих других социальных, экономических и политических проектах федерального и регионального масштаба).

Отсюда следует несколько выводов. Один из них – наметившийся «сетевой раскол», при котором «региональные интересы» во многих случаях (в частности, в ситуации выборов) превалируют под «федеральными». По данным ряда экспертов, в России в настоящее время выполняется 5% решений, принимаемых Президентом РФ. Другое объяснение состоит в том, что приоритеты и отношение к выборам на федеральном уровне за несколько месяцев, прошедших между парламентскими и президентскими выборами, изменилась.

И самый важный аспект состоит в том, что сетевые технологии, выкладывание информации в интернете кардинально меняют социально-политическую сферу. Она становится намного более «прозрачной», подобно тому, как сейчас рождается «открытая» или «обнаженная» экономика. Многие манипуляции, ранее верой и правдой служившие элитам, уже не могут быть использованы в сетевую эпоху или могут дать эффект, противоположный ожидаемому.

Самоорганизация в социальных сетях также определяется во многом сетевыми структурами – мы часто ориентируемся на мнение и оценки людей, входящих в нашу «личную сеть». Именно благодаря этому возникает согласие, общее мнение, проявляется «коллективное бессознательное», о котором писал Карл Юнг, выбираются и уточняются социальные роли. И «динамическая», «сетевая» социология, которая анализирует происходящее в социальных (не обязательно компьютерных) сетях, рождается у нас на глазах.

Ряд изменений на этом уровне, проявляющихся, в конечном счете, в динамике общественного мнения, заслуживают внимания и дают надежду.

Социологические теории и исторический опыт показывают, что государственные реформы могут быть спланированы и проведены «активным меньшинством», однако их судьба и результат определяются отношением большинства. Исходя из этого, очень существенен уровень доверия социальным институтам (грубо говоря, разность между теми, кто поддерживает этот институт, и теми, кто ему не доверяет). Для успеха реформ население должно одобрять действия нескольких институтов, проводящих реформы. Для социальной стабильности таких институтов в обществе должно быть 5-6 или больше.

До 2000 года, как показывает анализ результатов социологических опросов «Как живешь, Россия?», которые систематически проводились Институтом социально-политических исследований РАН, шансов на успех реформ не было. Отсутствовали институты, которым доверяло бы большинство граждан, да и мнения их о пути развития России кардинально отличались. Более половины граждан считали себя советскими людьми и поддерживали идеалы, смыслы и ценности той эпохи. Треть полагала, что в дальнейшем надо следовать западным образцам и выходить «на столбовую дорожку мировой цивилизации». Это дало основание влиятельному американскому политологу С.Хантингтону назвать мир России «расколотой цивилизацией» и предсказать ее уход с исторической арены в течение десятилетий.

Императив некритического подражания Западу и разрушения собственного воспроизводится вновь и вновь: чтобы «соответствовать международным стандартам», была разрушена отечественная школа и осуществлен переход к системе «бакалавр – магистр» (в условиях отсутствия спроса на рынке труда на «бакалавров» и непонимания, чему и как следует учить «магистров»). Несмотря на катастрофический результат этого «эксперимента» те же люди начинают корезить систему аттестации научных и педагогических кадров, чтобы и у нас был «доктор философии» – PhD.

Поэтому согласие в российском обществе, поддержка большинства дорогого стоят – без этого надеяться на успех преобразований не приходится.

В 2000 году в России появился один социальный институт – Президент РФ – получивший большой кредит доверия и поддержку большинства населения.

Руководством страны была поставлена задача вести внутреннюю политику таким образом, чтобы таких институтов появилось 3-4. Именно это определяет социальную стабильность и дает надежду на успех преобразований. Опросы показывают [22], что к настоящему времени эта задача решена. И хотя анализ показывает, что поддержка каждого из этих институтов очень сильно коррелирует с поддержкой населением президента, эти переменные в социальном пространстве страны трудно переоценить.

«Сетевой» взгляд, идеи, модели, алгоритмы, вероятно, преобразят социологию в ближайшее десятилетие, так же, как новые алгоритмы коммуникации стремительно меняют общество сейчас.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В свое время известный английский физик и писатель Чарльз Сноу обратил внимание на феномен, который был им назван «пропастью двух культур». Суть этого явления состоит в том, что представители естественнонаучной культуры всё дальше удаляются от наук о человеке и всё хуже понимают гуманитариев. Верно и обратное. С другой стороны, гуманитарии склонны игнорировать результаты естественников и математиков.

Для этого есть объективная основа – естественнонаучная культура устремлена в будущее. Она опирается на эксперимент, формализованные теории, эффективно использует математический аппарат. Этот комплекс наук отвечает на вопросы «Как и почему?».

С другой стороны, гуманитарные науки чаще всего смотрят в прошлое, во многом опираясь на традицию и авторитет. Они отвечают на очень важный вопрос «Что?».

Со времен Огюста Конта дисциплинарное деление наук казалось естественным и плодотворным. Однако с середины XX века становилось все более очевидным, что во многих важных случаях необходим синтез двух подходов, что многие решения опасно или невозможно принимать, опираясь только на здравый смысл и опыт прошлого.

Синергетика приняла вызов междисциплинарности, поставив себе целью «сшить» пространства естественных и гуманитарных наук и математического творчества, а также научиться готовить не узких профессионалов, знающих «всё ни о чем», а команды «специалистов по решению комплексных проблем», способных осмысливать целое, а не отдельные части.

И с этой точки зрения, рассматривая восхождение синергетики от одной парадигмы к другой, можно сказать, что она с построением моста между культурами от десятилетия к десятилетию справляется всё лучше и лучше.

Мы признательны В.К.Левашову за предоставленные данные и обсуждение актуальных проблем социологии, В.С.Стёпину, В.Г.Буданову, В.И.Аршинову и В.Е.Лепскому за обсуждение ряда проблемы философии науки, И.С.Табачуку, В.С.Курдюмову, И.А.Евину, Ю.А.Семёнову за энергичные усилия по самоорганизации сетевого сообщества России, а также А.В.Подлазову и В.Г.Комаровой за большую помощь в подготовке работы.

Литература

1. Лем С. Сумма технологии/ Собр. соч. Т.13 (дополнительный). – М.: Текст, 1996. – 463 с.
2. Малинецкий Г.Г. Пространство синергетики: Взгляд с высоты/ Синергетика: от прошлого к будущему. №60. – М.: Либроком, 2013. – 248 с.
3. Кун Т. Структура научных революций. – М.: АСТ, 2009. – 320 с.
4. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
5. Режимы с обострением: Эволюция идеи / Сборник статей/ Под ред. Г.Г.Малинецкого/ 2-е изд. испр. и доп. – М.: Физматлит, 2006. – 312 с.
6. Странные аттракторы/ Ред. Я.Г.Синай, Л.П.Шильников. – М.: Мир, 1981. – 256 с.
7. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: ИКИ, 2002.
8. Burtsev M.S., Turchin P.V. Evolution of cooperative strategies from first principles// Nature (Letters to Editor). 2006. N440, pp.1041–1044.
9. Йосс Ж., Джозеф Д. Элементарная теория устойчивости и бифуркаций/ Пер. с англ. – М.: Мир., 1983. – 301 с.
10. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего/ 3-е изд./ Синергетика: от прошлого к будущему. №3. – М.: Эдиториал УРСС, 2003. – 288 с.
11. Данилов Ю.А. Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение/ Изд.4, стереот./ Синергетика: от прошлого к будущему. – М.: URSS, 2011. – 208 с.
12. Босс В. Лекции по математике: Вероятность, информация, статистика/ Т.04/ Стереот. изд. – М.: Либроком, 2013. – 216 с.
13. Нелинейность в современном естествознании/ Изд.2/ Ред. Г.Г.Малинецкий/ Синергетика: от прошлого к будущему. №48. – М.: URSS, 2013. – 424 с.
14. Подлазов А.В. Закон Ципфа и модели конкурентного роста. Нелинейность в современном естествознании/ Изд.2/ Ред. Г.Г.Малинецкий/ Синергетика: от прошлого к будущему. №48. – М.: Либроком, 2013. С.229-256.
15. Бак П. Как работает природа: Теория самоорганизованной критичности/ Пер. с англ./ Синергетика: от прошлого к будущему. №66. – М.: Либроком, 2013. – 276 с.
16. Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В. Сравнение двумерных изотропных консервативных самоорганизованно-критических моделей типа кучи песка// Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Естественные науки. 2012, Спец. выпуск №2 «Математическое моделирование в технике», с.119-128.
17. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б., Подлазов А.В. Нелинейная динамика: Подходы, результаты, надежды/ Изд.3/ Синергетика: от прошлого к будущему. – М.: Либроком, 2011. – 280 с.
18. Малинецкий Г.Г., Маненков С.К., Митин Н.А., Шишов В.В. Когнитивный вызов и информационные технологии// Вестник РАН. 2011. Т.81, №8, с.707-716.
19. Малинецкий Г.Г. Чтоб сказку сделать былью... Высокие технологии – путь России в будущее/ Изд.2/ Синергетика: от прошлого к будущему. №58. – М.: Либроком, 2013. – 224 с.
20. Котов Ю.Б. Новые математические подходы к задачам медицинской диагностики/ Синергетика: от прошлого к будущему. – М.: Эдиториал УРСС, 2004. – 328 с.
21. Митин Н.А., Подлазов А.В. Щетинина Д.П. Исследование сетевых свойств Живого журнала// Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша, 2012. №78.
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-78>

22. *Подлазов А.В.* Математические методы исследования массивов данных социологического мониторинга// Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша, 2012. №71.
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-71>