

Новиков Н.Б.

Институт психологии РАН

Россия, г. Москва

Novikov N.B.,

Institute of Psychology RAS

Russia, Moscow

ТЕОРИЯ ХАОСА И ТЕОРИЯ ТВОРЧЕСТВА: НЕОЖИДАННЫЕ АНАЛОГИИ

Аннотация: Теория динамического хаоса, а также теория самоорганизующихся систем, возникшие в XX столетии благодаря усилиям множества ученых (А.Пуанкаре, Э.Лоренц, Б.В.Чириков, И.Пригожин, Г.Хакен и т.д.), расширили наше понимание роли детерминированных и стохастических процессов в эволюции систем различной природы. Идеи и принципы, сформулированные в этих областях научного знания, отличаются необычной простотой и одновременно фундаментальностью, глубиной проникновения в сущность природных явлений. Как ни удивительно, сопоставление результатов теории хаоса и концепции самоорганизации с результатами, полученными учеными в попытках описать закономерности творческой деятельности (прежде всего, научного поиска), позволяет выявить многочисленные аналогии между этими сферами знания. Можно констатировать существование определенной эквивалентности (изоморфизма) между основными принципами теории хаоса, теории самоорганизации и теории творчества (теории научного поиска). Наиболее очевидный пример этой эквивалентности – стохастичность развития динамических систем (в том числе возникновения порядка в сложных системах) и стохастичность интеллектуальных процедур (творческих

стратегий), используемых в процессе научного поиска. Примечательно, что стохастичность творческих стратегий позволяет решить 18-ю проблему С.Смейла, т.е. ответить на вопрос: каковы пределы интеллекта – как искусственного, так и человека?

Ключевые слова: хаос, самоорганизация, случайные флуктуации, энтропия, принцип открытости систем, детерминированные и вероятностные (стохастические) алгоритмы мышления и творчества, индуктивные методы исследования, случайные научные открытия, 18-я проблема С.Смейла.

Abstract: *The theory of dynamic chaos, as well as the theory of self-organizing systems, which arose in the XX century thanks to the efforts of many scientists (A. Poincare, E. Lorenz, B.V. Chirikov, I. Prigogine, H. Haken, etc.), have expanded our understanding of the role of deterministic and stochastic processes in the evolution of systems of various nature. The ideas and principles formulated in these areas of scientific knowledge are distinguished by their unusual simplicity and, at the same time, by the depth of penetration into the essence of natural phenomena. Surprisingly, a comparison of the results of the theory of chaos and the concept of self-organization with the results obtained by scientists in the theory of creativity (first of all, scientific creativity) reveals numerous analogies between these spheres of knowledge. One can state the existence of a certain equivalence (isomorphism) between the basic principles of chaos theory, the theory of self-organization and the theory of creativity (the theory of scientific search). The most obvious example of this equivalence is the stochasticity of the development of dynamical systems (including the emergence of order in complex systems) and the stochasticity of intellectual procedures (creative strategies) used in the process of scientific research. It is noteworthy that the stochasticity of creative strategies allows us to solve the 18th problem of S. Smale, i.e. to answer the question: what are the limits of intelligence - both artificial and human?*

Key words: *chaos, self-organization, random fluctuations, entropy, the principle of openness of systems, deterministic and probabilistic (stochastic) algorithms of thinking and creativity, inductive research methods, random scientific discoveries, S. Smale 18th problem.*

1. Ошибка Анри Пуанкаре и рождение теории хаоса

В 1885 г. выдающийся шведский математик Геста Миттаг-Леффлер убедил короля Швеции и Норвегии Оскара II учредить крупную денежную премию и подготовить медаль для вручения первому ученому, который получит глобальное (общее) решение задачи трех и более тел, взаимодействующих друг с другом по законам Ньютона. Эта задача заключалась в том, чтобы найти метод интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействие произвольного числа тел, т.е. получить аналитическое решение данной задачи. В 1888 г. Анри Пуанкаре отправил на конкурс свою работу, которая содержала 270 страниц и представляла собой результат почти трехлетних исследований французского математика. А.Пуанкаре был уверен, что ему удалось решить проблему, поставленную Г.Миттаг-Леффлером. Члены жюри, в том числе К.Вейерштрасс и Ш.Эрмит, высоко оценили труд Пуанкаре и вручили ему премию, согласившись с тем, что задача трех и более тел допускает интегрирование, как и задача двух тел, решенная еще Ньютоном.

Однако вскоре Пуанкаре обнаружил ошибку в своей работе. Оказалось, что траектории взаимодействующих тел могут непредсказуемым образом пересекаться и разбегаться (перепутываться), поэтому говорить об интегрируемости упомянутой задачи нет оснований. Исправляя свой просчет, французский математик установил, что динамика взаимодействующих тел может быть хаотичной [1, 2]. Обнаружилась зависимость поведения динамической системы от начальных условий, чувствительность к этим

начальным условиям, что впоследствии было названо «эффектом бабочки». На средства полученной премии Пуанкаре был вынужден скупить все экземпляры журнала, содержавшего его ошибку, чтобы опубликовать исправленный вариант статьи. Так впервые появилась на свет теория хаоса, которая продемонстрировала ограниченность детерминизма Ньютона – Лапласа. Ю.А.Данилов [3] дал следующую оценку этой работы Пуанкаре: «Открытие сложных хаотических режимов позволило не только понять природу неинтегрируемости задач динамики, но и постичь ограниченность так называемого ньютоновского детерминизма, по-новому взглянуть на природу случайного. Экспоненциальное разбегание первоначально близких траекторий, вынужденных оставаться в ограниченной части фазового пространства, приводит к их перепутыванию, т.е. в конечном счете, к хаотизации» [3, с.175].

Впоследствии хаос открывался при исследовании других проблем. Так, американский математик и метеоролог Эдвард Нортон Лоренц (1961) столкнулся с ним, моделируя погодные явления с помощью нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка, описывающих ряд параметров атмосферы (движение воздушных потоков и т.д.). Обычно Лоренц вводил в компьютер все цифры с точностью до шестого знака после запятой, но однажды ограничился точностью до третьего знака. Получив в последнем случае результат, разительно отличающийся от предыдущих, Лоренц понял, что эволюция такой динамической системы, как земная атмосфера, весьма чувствительна к начальным условиям.

Одним из основоположников теории хаотических систем является российский физик Борис Валерианович Чириков (1928-2008), который обнаружил явление динамического хаоса в 1959 г., изучая поведение заряженных частиц в магнитных ловушках, предложенных Г.И.Будкером в рамках проекта разработки управляемого термоядерного синтеза. Свои результаты Б.В.Чириков изложил в статье «Резонансные процессы в

магнитных ловушках» [4]. В этой работе он сформулировал критерий стохастичности – критерий перекрытия резонансов для хаоса, возникающего в консервативной системе. Другими словами, Б.В.Чириков (1959) открыл критерий возникновения хаотических колебаний в такой системе.

Вместе с тем, первые признаки (проявления) динамического хаоса, как мы уже отметили, были описаны Пуанкаре (1888) в небесной механике, в процессе решения задачи гравитационного взаимодействия трех и более тел. И, как мы увидели, развитие нового раздела науки началось с ошибки – весьма серьезной, но своевременно исправленной Пуанкаре.

2. Ошибка Давида Гильберта и возникновение идеи об ограниченности формальных систем

Раздел науки, именуемый «теорией научного творчества» (или «методологией научного творчества»), развивался в XX столетии под знаком мысли об ограниченности формальных систем. Формальные системы – это теории, достигшие строгой формализации, предполагающей полную абстракцию от смысла слов используемого языка. В такой теории все условия, регулирующие употребление этих слов, явно высказаны посредством аксиом и правил, позволяющих вывести одну фразу из другой. Формальная система считается определенной, если а) задано конечное или счетное множество произвольных символов; б) имеется подмножество выражений, называемых формулами; в) выделено подмножество формул, называемых аксиомами; г) имеется конечное множество отношений между формулами, называемых правилами вывода.

Успехи формализации ряда математических теорий, выражения результатов этих теорий в аксиоматико-дедуктивной форме, заставили некоторых ученых поверить в то, что вся наука может быть формализована. Кроме того, они поверили, что и сам метод открытия научных истин может

представлять собой формальную систему, четко определенную совокупность предписаний (инструкций), позволяющих постигать законы природы без обращения к опытам (экспериментам). Возникло убеждение, что единственный путь «проникновения в тайны Вселенной» - использование строгих (детерминированных) алгоритмов и, прежде всего, дедуктивных методов обработки информации. Разумеется, подобные алгоритмы - прямая противоположность нестрогих (вероятностных) алгоритмических стратегий.

Одним из тех, кто разделял подобное убеждение, был немецкий математик и философ Готфрид Вильгельм Лейбниц (1646-1717), который выдвинул проект создания «универсальной характеристики», «универсального языка», под которым он понимал некий универсальный (строгий, детерминированный) алгоритм исследования окружающего мира. Парадоксально, но основой этого алгоритма он считал «механические манипуляции с символами», а не эксперимент и наблюдения. Восхищаясь строгостью геометрии Евклида, в которой те или иные утверждения дедуктивно выводятся из небольшого числа аксиом, Лейбниц забыл поинтересоваться, откуда берутся сами аксиомы. Другими словами, факт эмпирического происхождения этих аксиом оказался за пределами его внимания.

В начале XX века проект «универсальной характеристики» Лейбница возродился в несколько необычном виде: немецкий математик Давид Гильберт основал программу «формализации математики». Но на пути к достижению этой цели он предложил сначала формализовать арифметику – один из разделов математической науки. В частности, в 1900 г. на II Международном конгрессе математиков в Париже Д.Гильберт выступил с докладом, в котором изложил список 23-х математических проблем, ожидающих решения. В этом списке под номером 2 фигурировала задача «доказать непротиворечивость арифметики формальными средствами самой арифметики». Д.Гильберт верил в положительное решение этой задачи, так

как считал возможным аксиоматизировать всю математику, превратить ее в строгую формальную систему, в которой новые математические истины открываются путем оперирования абстрактными символами, на основе дедуктивных правил, подобных правилам «универсального алгоритма» Лейбница.

Однако вскоре выяснилось, что Д.Гильберт серьезно заблуждается. В 1931 г. австрийский логик Курт Гедель опубликовал работу «О принципиально неразрешимых положениях в системе Principia Mathematica и родственных ей системах», в которой доказал свою знаменитую теорему о неполноте. Этот результат показал невозможность положительного решения задачи доказать непротиворечивость арифметики средствами самой арифметики. Кроме того, теорема Геделя показала невозможность аксиоматизировать всю математику, т.е. неосуществимость предложенной Д.Гильбертом программы формализации всей математической науки (и методов, с помощью которых открываются новые математические истины).

В 1936 г. английский математик Алан Тьюринг доказал теорему о неразрешимости проблемы остановки «универсальной машины Тьюринга». Этот результат показал алгоритмическую неразрешимость еще одной задачи Д.Гильберта («проблемы разрешимости», сформулированной им в 1928 г.): найти алгоритм, который, функционируя на основе формального языка, мог бы после конечного числа шагов определить истинность или ложность произвольного математического утверждения.

Описывая указанную «проблему разрешимости», поставленную Д.Гильбертом в 1928 г., и оценивая теоремы К.Геделя и А.Тьюринга, которые «разрушили надежды» Д.Гильберта, Н.Бурбаки в книге «Очерки по истории математики» [5] констатирует: «Уже среди обширных проектов Лейбница вопрос о решении этой проблемы занимал почетное место, и одно время школа Гильберта, по-видимому, считала, что подошла совсем близко к его разрешению. Действительно, для формализмов, содержащих мало

первоначальных знаков и аксиом, можно описать эти процессы. Но усилия, направленные на уточнение проблемы разрешимости посредством четкого определения того, что следует понимать под «универсальным процессом», до сих пор приводили только к отрицательным результатам» [5, с.59].

По большому счету, теоремы Геделя и Тьюринга продемонстрировали, что процесс математического (и вообще научного) исследования не может сводиться к «механическому» использованию каких-либо детерминированных алгоритмов, к манипуляциям символами и правилами какого-либо формального языка. Научные открытия, расширяющие горизонт наших знаний, не могут быть результатом одной лишь дедукции. Мы можем делать эти открытия на основе правил, но эти правила (как показывает история науки) часто представляют собой вероятностные алгоритмы, а в ряде случаев - «обычный» метод проб и ошибок, в котором существуют элементы непредсказуемости (стохастичности).

Таким образом, ошибка А.Пуанкаре (1888), исправление которой привело к рождению теории хаоса, вполне аналогична ошибке Д.Гильберта (1900, 1928), исправление которой привело к пониманию ограниченности формальных систем и основанных на этих системах строгих (детерминированных) алгоритмов. Подобно тому, как исправляя свою ошибку, Пуанкаре открыл хаотические (стохастические) решения в эволюции динамических систем, так и корректировка ошибки Гильберта помогла осознать, что творческий процесс (процесс научного поиска) включает в себя стохастические стратегии, результат применения которых нельзя предсказать однозначно.

Если представить путь к открытию как эволюционный процесс от незнания к знанию, то уже сопоставление ошибок Пуанкаре и Гильберта позволяет заметить определенную аналогию между этим когнитивным процессом и эволюцией динамических систем, включающей элементы непредсказуемости (недетерминированности). Разница лишь в том, что

Пуанкаре сам обнаружил и исправил свою ошибку, тогда как Гильберт не смог этого сделать, и понадобились усилия Геделя и Тьюринга, чтобы установить ограниченность формалистского подхода к описанию творчества.

3. Аналогия между теоремой Геделя о неполноте и принципом Берталанфи - Пригожина об открытости самоорганизующихся систем

В 1937 г. австрийский ученый Людвиг фон Берталанфи (1901-1972) предложил концепцию, названную «общей теорией систем». На семинаре по философии в Чикагском университете (США) он высказал идею о наличии общих закономерностей в функционировании ряда физических, биологических и социальных объектов. Иначе говоря, он обратил внимание на изоморфизм (эквивалентность) законов, управляющих функционированием систем различной природы. Кроме того, фон Берталанфи ввел понятие «открытых систем» - систем, которые постоянно обмениваются веществом и энергией с внешней средой.

Один из основоположников неравновесной термодинамики и создатель теории диссипативных структур Илья Пригожин (1917-2003) подхватил и развил понятие открытых систем. Теперь можно говорить, что основным механизмом существования самоорганизующихся систем является принцип их открытости, принцип постоянного обмена веществом, энергией (и информацией) с той средой, которая окружает данную систему.

Система не в состоянии эффективно функционировать, если нарушается этот принцип открытости. Можно привести массу примеров «работы» этого правила, но, на наш взгляд, достаточно отметить, что если изолировать какой-либо крупный город, отрезать его от всех связей с внешним миром (включая транспортные и информационные сообщения), то будет поставлено под угрозу его дальнейшее развитие и существование.

И.Пригожин изложил свой взгляд на принцип открытости самоорганизующихся систем в интервью, представленном в статье [6]. Свой рассказ ученый начинает с книги Э.Шредингера «Что такое жизнь» (1944), которая оказала значительное впечатление на создателя неравновесной термодинамики: «Книгу Шредингера о жизни я читал с большим удовольствием, и в ней меня заинтересовали два аспекта. Первый состоял в том, что жизнь возможна только за счет обмена энтропией, то есть должен быть поток энергии. И второй: как это получилось, что жизнь так устойчива? Из крокодила получается крокодил, из курицы – курица. Речь идет не только о наследственности, но и о стабильности. Шредингер думал, что эта устойчивость подобна хорошим часам, то есть имеет механическое происхождение. Мне трудно было с этим согласиться. Аналогия, которая пришла мне тогда в голову, связана с городом. Ведь город живет только потому, что он есть открытая система – если вы изолируете его, то он постепенно прекратит существование. А взаимодействия внутри города – это то, что делает систему стабильной. В эту аналогию я верю еще и теперь, и думаю, что она представляет очень важный элемент моей теории» [6, с.31].

Внимательный анализ позволяет выявить глубокую аналогию между принципом открытости Бергаланфи – Пригожина и теоремой Геделя о неполноте. Как мы уже отметили, эта теорема показала, что математика (и наука вообще) не может быть представлена в виде замкнутой формальной аксиоматико-дедуктивной системы, развивающейся без использования результатов наблюдения и эксперимента. Поскольку математика (как и наука вообще) постигает закономерности внешнего мира, наблюдение и эксперимент являются для науки «окном» в этот внешний мир. Перестаньте наблюдать и экспериментировать – и вы лишитесь способности правильно описывать этот мир. Таким образом, любая теория должна взаимодействовать с внешним миром посредством постоянного экспериментирования, проверяя и корректируя свои постулаты. Это взаимодействие, предполагающее

постоянное извлечение новой информации из окружающего мира, - аналог постоянного обмена системы с внешней средой веществом, энергией и информацией. Выдвигая программу формализации математики, Д.Гильберт, по сути дела, хотел изолировать науку от наблюдения и эксперимента, тогда как теорема Геделя о неполноте, напротив, наложила запрет на успешное функционирование замкнутых формальных систем. Именно поэтому специалисты подчеркивают, что запреты и ограничения, налагаемые теоремой Геделя, снимаются, если формальные системы начинают взаимодействовать с внешним миром, т.е. избавляются от статуса «замкнутых (закрытых) формальных систем».

Одним из первых ученых, осознавших такой способ снятия ограничений теоремы Геделя, был отечественный математик и логик, академик АН СССР, Виктор Михайлович Глушков (1923-1982). В работе «Развитие абстрактного мышления и запрет Геделя» [7] он пишет: «...Налагаемый теоремой Геделя запрет снимается, когда формальные системы абстрактного мышления рассматриваются не изолированно, а в процессе непрерывного развития во взаимодействии с окружающим миром» [7, с.134].

В свое время американский математик, удостоенный премии Филдса за вклад в теорию множеств, Пол Джозеф Коэн (1934-2007) высказал следующее суждение о программе формализации Д.Гильберта: «Жизнь была бы гораздо приятнее, не будь гильбертовская программа потрясена открытиями Геделя». Возражая ему, А.Н.Паршин подчеркнул, что «если бы не было теоремы Геделя, то жизнь не только не была бы приятнее, ее просто не было бы» [8, с.30]. Далее А.Н.Паршин высказывает предположение, что некий аналог теоремы Геделя должен существовать и в биологии.

Описанная нами аналогия между результатом Геделя и принципом Берталанфи – Пригожина, показывающая, что теорема Геделя о неполноте является «информационным эквивалентом» принципа открытости

самоорганизующихся систем, свидетельствует о справедливости точки зрения А.Н.Паршина.

4. Стохастичность динамических систем и вероятностная природа индуктивных выводов

Как отмечено выше, А.Пуанкаре (1888) обнаружил хаотические решения в задаче трех и более тел, взаимодействующих друг с другом по законам Ньютона. Б.В.Чириков (1959), изучая поведение заряженных частиц в магнитных ловушках, сформулировал критерий стохастичности (перекрытия резонансов), а Э.Н.Лоренц (1961) открыл признаки хаоса, моделируя погоду с помощью нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка.

Добавим, что до Пуанкаре неинтегрируемость многих динамических систем установил немецкий математик Генрих Брунс (1848-1919). Он учитывал результаты Э.Бура и Ж.Лиувилля (1855), которые связали интегрирование гамильтоновой системы в квадратурах с существованием достаточно большого набора ее первых интегралов. Рассматривая задачу трех тел, Г.Брунс (1887) доказал теорему об отсутствии полного набора алгебраических интегралов, позволяющих исчерпывающим образом решить эту задачу. Обобщая этот результат, Пуанкаре сформулировал теорему о несуществовании интегрируемых систем.

И.Р.Пригожин описывает эти математические достижения в книге «От существующего к возникающему» [9]: «Физики и математики, работавшие в XIX в. над проблемами классической динамики, занимались поиском интегрируемых систем, и это вполне понятно: стоит найти преобразование, приводящее исходные уравнения к гамильтонову виду, как задача интегрирования становится тривиальной. Нужно ли говорить, сколь сильное потрясение испытало всё ученое сообщество, когда Генрих Брунс впервые доказал (а Пуанкаре обобщил полученные Брунсом результаты), что

большинство наиболее интересных проблем классической динамики, начиная с проблемы трех тел (например, Солнца, Земли и Луны), не сводится к интегрируемым системам» [9, с.49].

Обсуждая указанную теорему Пуанкаре, И.Р.Пригожин раскрывает причину ее справедливости: «Резонансы приводят к столь нерегулярному движению, что инварианты движения, кроме гамильтониана, не являются более аналитическими функциями переменных «действие». Назовем это явление «катастрофой Пуанкаре». Оно играет важную роль в последующих главах нашей книги» [9, с.56].

Существует ли в теории творчества некий аналог этой «катастрофы Пуанкаре», которую И.Р.Пригожин связал с теоремой о неинтегрируемости большинства динамических систем? Да, существует.

После того, как Аристотель построил теорию дедуктивных рассуждений (силлогистику), он задался целью разработать аналогичную теорию для индуктивных рассуждений. Ему казалось, что достоверность индуктивных выводов легко достигается достоверностью исходных посылок (как в случае дедукции). Однако здесь нужно было учитывать еще один фактор, определяющий справедливость индуктивных умозаключений, – количество исходных посылок (описывающих отдельные элементы систем, о которых делается обобщающий вывод). Чтобы избежать ошибочных выводов, нужно рассматривать все элементы системы, а не отдельную их часть. Однако эта задача осложняется тем, что многие системы состоят из колоссального числа элементов, следовательно, нам требуется значительное время и значительные материальные ресурсы для изучения всех этих элементов. В результате Аристотель потерпел неудачу в построении теории индуктивных силлогизмов.

Д.А.Поспелов в книге «Моделирование рассуждений» [10] пишет об Аристотеле: «Увлеченный красотой и стройностью воздвигнутого им здания силлогистики, он попытался втиснуть в его объемы и индуктивное рассуждение, ввести схему индуктивного силлогизма. Но здесь его

подстерегала неудача. Индуктивные рассуждения никак не хотели отливаться в ту стройную форму, которая так подошла дедуктивным рассуждениям» [10, с.87].

В дальнейшем ученые поняли, что индукция – в отличие от дедуктивных умозаключений - имеет вероятностную природу. Наши знания об элементах большинства изучаемых систем являются фрагментарными, то есть не охватывают все элементы. Поскольку существенная часть наших индуктивных обобщений основывается на неполной информации, эти обобщения обладают определенной вероятностью истинности (а не гарантированной истинностью). Этот факт понимал Лейбниц, что явилось одной из причин, заставивших его приступить к разработке проекта «универсальной характеристики» (универсального алгоритма, в самом себе содержащего критерии истинности). Г.Г.Майоров в предисловии к 3-му тому «Собрания сочинений» Лейбница [11] раскрывает его позицию относительно возможностей индуктивного метода: «В общем случае индукция всегда неполна, и ее выводы не имеют силы необходимости, они могут создавать лишь большую или меньшую уверенность в том, что и впредь всегда будет так, как было, т.е. могут обладать только «моральной достоверностью»; этого недостаточно для теоретических, аподиктических наук» [11, с.14].

Согласившись с тем, что индукция гарантирует вероятность истины, Пьер Лаплас (1749-1827) предположил, что эту вероятность можно описать математически, а именно с помощью разработанных к тому времени средств математической теории вероятностей. Свой подход он изложил в трактате «Опыт философии теории вероятностей» (1814). В конце концов, после многочисленных попыток, Лаплас вынужден был констатировать: «Трудно оценить вероятность результатов индукции» [12, с.338]. Аналогичные попытки предпринимал его соотечественник Николя де Кондорсе (1743-1794), который также не достиг успеха.

По существу, причиной этих неудач являются те же обстоятельства, которые помешали Аристотелю создать эффективную теорию индуктивных силлогизмов. Многие природные системы состоят из колоссального (иногда бесконечного) числа элементов. Чтобы изучить каждый из этих элементов, нужно обладать колоссальным временем и колоссальными материальными ресурсами. Степень истинности индукции зависит от количества рассмотренных элементов (А), поэтому для определения этой степени истинности нужно заранее и точно знать количество всех элементов изучаемой системы (В). Вычитание А из В даст нам величину, характеризующую достоверность индуктивного умозаключения. Однако в большинстве случаев мы не можем знать заранее число элементов той или иной системы, поэтому наши попытки математически точно выразить вероятность индукции оказываются безрезультатными («повисают в воздухе»).

Оценивая эту ситуацию, британский математик, логик и философ Бертран Рассел пишет: «Со времен Лапласа делались различные попытки показать, что вероятная истинность индуктивного вывода вытекает из математической теории вероятности. Теперь всеми признается, что все эти попытки были безуспешными...» [13, с.352]. «Во-первых, - продолжает автор, - в математической теории вероятности нет ничего, что оправдывало бы наше понимание как общей, так и частной индукции как вероятной, как бы при этом ни было велико установленное число благоприятных случаев» [13, с.361].

Об этом же говорит Д.Пойа в книге «Математика и правдоподобные рассуждения» [12]: «Никто еще не предложил ясного и убедительного метода вычисления правдоподобностей в нетривиальных случаях, и если мы ясно себе представим конкретные ситуации, в которых важна правильная оценка правдоподобностей, то мы легко сможем понять, что любое приписывание правдоподобностям определенных числовых значений подвергается большой опасности показаться глупым» [12, с.368].

Мы могли бы назвать эту ситуацию «катастрофой Аристотеля - Лапласа» или, например, «катастрофой Лапласа - Кондорсе», но не станем этого делать. Безусловно, неинтегрируемость большинства динамических систем (описываемая теоремой Пуанкаре) имеет сходство с невычислимостью степени вероятности индукции. Однако, учитывая огромное количество научных открытий, сделанных при помощи неполной индукции, т.е. учитывая высокую продуктивность индуктивных методов обработки информации, воздержимся от того, чтобы именовать указанную ситуацию «катастрофой». На самом деле (в глобальном смысле), катастрофой оказалось бы такое устройство мира, в котором нам была бы доступна лишь дедукция, а индукции физически не существовало. В этом случае не существовало бы и таких вещей, как наука и научное познание.

5. Аналогия между теорией энтропии и теорией информации

Мы знаем, что И.Р.Пригожин является одним из создателей теории самоорганизующихся систем. В состав этой теории вошли многие результаты, полученные им при разработке неравновесной термодинамики (термодинамики необратимых процессов). В свою очередь, основные принципы неравновесной термодинамики были сформулированы И.Р.Пригожиным (а также Ларсом Онсагером) по аналогии с равновесной термодинамикой [14]. Поэтому нет ничего удивительного в том, что, рассматривая концепцию самоорганизации, мы встречаем в ней ряд принципов этой термодинамики или, другими словами, статистической физики, в том числе понятие энтропии. Примечательно, что понятие энтропии, проникнув в теорию неравновесных процессов, давно перешагнуло границы этого раздела науки, и сегодня широко используется в области, весьма, казалось бы, далекой от термодинамики, - теории информации.

Понятие энтропии было введено в науку Рудольфом Клаузиусом (1865). Он обобщил идеи С.Карно (1824), который показал, что условием эффективной работы тепловой машины является наличие разности (перепада) температур. Р.Клаузиус заметил, что все физические процессы идут таким образом, что перепад температур между различными объектами уменьшается, поскольку энергия необратимо рассеивается. Это рассеяние энергии, приводящее к выравниванию температур между разными телами, он и назвал энтропией. Сформулированный им принцип постоянного роста энтропии (ее стремления к максимуму) стал называться «вторым законом термодинамики». В дальнейшем Р.Клаузиус пытался доказать этот принцип методами классической механики, но безуспешно (поскольку классической механике чужда идея необратимости).

Аналогичные попытки предпринимал австрийский физик Людвиг Больцман (1844-1906), но на одном из этапов исследований он понял, что второе начало термодинамики имеет статистическую природу. Л.Больцман показал, что принцип роста энтропии нельзя вывести из законов классической механики, что единственный способ доказать справедливость данного принципа состоит в использовании средств математической теории вероятностей. Той самой теории, которая выросла в трудах Б.Паскаля и П.Ферма из анализа азартных игр и тех случайных событий, которые доминируют в этих играх. Многие ученые (Й.Лошмидт, А.Пуанкаре, Э.Цермело и т.д.) не согласились с такой трактовкой энтропии, с тем, что она означает вероятность – всего лишь вероятность! – осуществления некоторого макроскопического состояния системы. Однако Л.Больцман был прав, и его знаменитая формула, связывающая энтропию и вероятность ($S = \ln W$), вошла в золотой фонд науки.

А в 1948 г. американский математик и инженер Клод Шеннон (1916-2001), разрабатывая теорию связи, предложил измерять количество информации с помощью формулы, совершенно аналогичной формуле

энтропии Больцмана. Другими словами, К.Шеннон перенес формулу энтропии Больцмана из статистической физики в теорию информации, тем самым перебросив мост между весьма далекими научными дисциплинами. Сначала многие ученые, включая и самого К.Шеннона, объясняли этот перенос (транспонирование) удобством расчетов. Но постепенно стал проясняться глубокий смысл того, почему одно и то же математическое соотношение успешно «работает» в термодинамике и теории информации. Как пишет Е.А.Седов, «стало понятно, что и Больцман, и Шеннон, в сущности, занимались одной и той же проблемой соотношения хаоса и порядка, хотя и подошли к ней и к связанной с ней цепочке систем и явлений с противоположных сторон» [15, с.168].

Наблюдая за тем, как формула энтропии неожиданно «перекочевала» из статистической физики в теорию информации, можно задать вопрос: был ли это однонаправленный процесс? Не происходила ли обратная трансляция идей и методов из теории информации в статистическую физику? Оказывается, происходила, что позволяет говорить о взаимовыгодном обмене идеями между указанными разделами науки!

В 1957 г. преподаватель Стэнфордского университета Эдвин Томпсон Джейнс (Edwin Thompson Jaynes) в одной из своих статей показал, что методами К.Шеннона можно воспроизвести все результаты не только основ классической термодинамики, но и результаты Д.Гиббса, относящиеся к области статистической термодинамики. В 1961 г. эта идея была обобщена американским профессором М.Трайбусом в статье «Теория информации – основа термостатики и термодинамики» [16].

Результаты Э.Т.Джейнса получили высокую оценку со стороны специалистов. Так, Л.М.Мартюшев в работе «Принцип максимума производства энтропии: история возникновения и современное состояние» [17] подчеркивает: «Хотя изначально теория информации создавалась с помощью некоторых понятий статистической физики, в настоящее время,

следуя Джейнсу, можно принять информационный подход за основу при построении статистической физики. Тогда формализм статистической механики оказывается некой последовательностью действий, выполняя которые, мы имеем возможность получить наилучшую оценку при существенной ограниченности наших знаний о микромире (это статистическая методика предупреждения возможных ошибок)» [17, с.593-594]. Аналогичная оценка работ Э.Т.Джейнса содержится в [18].

Интересно, что Э.Т.Джейнс отождествлял используемый в теории информации (и статистической физики) принцип максимума производства энтропии с принципом индуктивного вывода. Академик РАН В.П.Маслов в статье [19], написанной совместно с В.В.Вьюгиным, отмечает: «В теории информации принцип максимума энтропии также известен как принцип индуктивного вывода, который используется во многих прикладных задачах для построения вероятностных распределений на объектах, удовлетворяющих заданным ограничениям [1-3]» [19, с.97]. Здесь [1] – публикация Э.Т.Джейнса (1989).

6. Энтропия индуктивных и дедуктивных выводов

Какова энтропия индукции? Можно ли вообще применять понятие энтропии к этой мыслительной операции? Уместно ли сравнивать энтропию индукции и дедукции? Как ни удивительно, сформулированные вопросы имеют положительный ответ.

Прежде всего, следует вспомнить, что индуктивный метод исследования природы – это не только обобщение имеющихся эмпирических данных, но и постановка экспериментов, нацеленных на получение этих данных. Английский методолог Ф.Бэкон (1561-1626), развивая свою концепцию индукции и индуктивной деятельности, понимал ее именно таким образом: как

постоянное экспериментирование, позволяющее получать новую информацию, которая в дальнейшем анализируется и обобщается.

Для получения дедуктивного вывода достаточно иметь большую и малую посылку силлогизма («все люди смертны», «Сократ - человек»). Сопоставление сведений, содержащихся в этих посылках, автоматически приводит к правильному умозаключению. Процедура использования индукции гораздо сложнее: здесь нужно последовательно накапливать информацию об интересующей нас системе (множестве), ставить эксперименты и затрачивать материальные ресурсы для того, чтобы добиться максимума рассмотренных элементов системы. Лишь в этом случае мы можем быть уверенными, что наши обобщения будут адекватными, правильно отражающими реальность.

Постановка экспериментов неизбежно связана с выполнением определенной работы или, другими словами, совокупности рабочих операций различных видов. Слово «работа» сразу напоминает закономерности термодинамики, и это неслучайно. Термодинамические принципы говорят о том, что выполнение любой работы сопряжено с затратами энергии, а затраты энергии – с энтропией. Максимум энергетических затрат соответствует максимуму энтропии. Отсюда следует, что индуктивные методы постижения окружающего мира – это «энтропийные» методы, то есть процедуры (стратегии), связанные с высокой величиной энтропии. И, наоборот, дедуктивные операции – это операции, соответствующие минимуму производства энтропии. Таким образом, энтропия индукции всегда выше энтропии дедукции ($S_{\text{индукции}} > S_{\text{дедукции}}$).

Сформулированный нами принцип о превосходстве энтропии индукции над энтропией дедукции мог быть открыт еще в 1929 г., но почему-то этого не произошло. В этом году венгерский физик Лео Сцилард (1898-1964) опубликовал статью, в которой содержалось решение парадокса «демона Максвелла». Как известно, этот «демон», придуманный Джеймсом

Максвеллом (1831-1879), обладал способностью сортировать молекулы, находящиеся в замкнутом сосуде, по скоростям так, что в одной половине сосуда концентрировались быстрые («горячие») молекулы, а в другой половине – медленные. Максвелл считал, что его изощренный «демон-сортировщик» может нарушать второе начало термодинамики, то есть «отменять» принцип роста энтропии Клаузиуса. Однако в 1929 г. Л.Сцилард показал, что для осуществления подобной сортировки «демон» должен распознавать быстрые и медленные молекулы, а для этого требуется измерять их скорости. Иначе говоря, «демон» должен владеть информацией о динамике молекул, для чего необходимо выполнить работу (измерение), а работа связана с затратами энергии и, соответственно, ростом энтропии. Описание этой статьи Л.Сциларда можно найти в [20, 21].

Этот результат Л.Сциларда можно было применить для сравнения индуктивных и дедуктивных способов изучения природы, но никто этого не сделал. Ученые обратили лишь внимание на то, что Л.Сцилард, решая парадокс «демона Максвелла», ввел в физику понятие информации за три десятилетия до трудов К.Шеннона. Впервые сравнение «энтропийных» характеристик индукции и дедукции (хотя и бегло, мимолетно) провел канадский физик Джон Киркалди (John Kirkaldy) в 1965 г. в статье «Термодинамика человеческого мозга» [22]. Как пишет Л.М.Мартюшев в уже цитировавшейся нами работе [17], «Первое обсуждение процессов в мозге с позиции экстремизации производства энтропии можно обнаружить в 1965 г. у уже упоминавшегося ранее несколько раз Д.Киркалди [207], рассматривавшего мозг как необратимую систему, в которую поступают потоки энергии и информации из окружающей среды. Процессы в мозге сопровождаются, по мнению Киркалди, то уменьшением производства энтропии (например, при обучении и дедукции), то максимизацией (например, при творчестве и индукции)» [17, с.610]. Здесь [207] – это статья Д.Киркалди «Термодинамика человеческого мозга» (1965).

А.Азимов в книге «Путеводитель по науке» [23] отмечает: «Евклид сумел свести аксиомы к нескольким простым определениям. Из этих аксиом он создал сложную и величественную систему, получившую название евклидова геометрия. Никогда не было создано так много практически из ничего, и наградой Евклиду стало то, что его учебник используют с незначительными изменениями более 2000 лет. Греки были влюблены в заманчивую игру под названием «дедукция» и, увлекшись, совершили две серьезные ошибки. Они сочли дедукцию наиболее приемлемым средством достижения знаний, хотя и были достаточно осведомлены, что в некоторых случаях ее будет недостаточно; например, расстояние от Афин до Коринфа нельзя определить с помощью абстрактных принципов, это расстояние следовало измерить» [23, с.13].

Слова А.Азимова о том, что «греки были влюблены в заманчивую игру под названием «дедукция» (и недооценивали индукцию и эксперимент), допускают интересную интерпретацию. В свете сформулированного выше принципа о том, что индуктивным методам соответствует более значительная величина энтропии, чем дедукции, становится ясно, что греки попросту заставили себя поверить в возможность «проникновения в тайны Вселенной» без существенных усилий, т.е. постепенного накопления фактов, обосновывающих наши индуктивные гипотезы. На языке термодинамики можно сказать: греки пытались избежать затрат энергии и, следовательно, максимума производства энтропии.

Те же самые рассуждения применимы к «универсальной характеристике» (универсальному алгоритму) Г.Лейбница и программе формализации математики Д.Гильберта. Эти крупные математики делали ставку на формальные системы, так как «оставляли в тени» эмпирическое происхождение научных знаний, в том числе тот факт, что индуктивное исследование, опирающееся на эксперимент (а он может быть весьма дорогостоящим), - реальный механизм прогресса науки.

Наряду с понятием энтропии индуктивного вывода можно ввести понятие стоимости исходных посылок этого вывода. Стоимость исходных посылок индукции – это стоимость материальных ресурсов, которые мы затрачиваем на получение новой информации, являющейся материалом для индуктивных гипотез. Другими словами, указанная стоимость – это количество энергии и вещества, которые необходимы для получения информации. Ниже приводится таблица наиболее известных научных проектов последнего времени с указанием их стоимости. Данная таблица дополнительно иллюстрирует мысль о связи между индукцией, энтропией и стоимостью ресурсов, с помощью которых мы изучаем внешний мир.

Таблица 1. Научные проекты и их стоимость

№	Наименование научного проекта	Наиболее известное научное открытие, сделанное в рамках проекта	Стоимость проекта
1.	Стэнфордский линейный ускоритель частиц (США)	Открытие кварковой структуры протонов (1973), авторы открытия - Джером Фридман, Ричард Тейлор, Генри Кендалл (Нобелевская премия 1990 г.)	125 миллионов долларов США
2.	Кольцевой ускоритель частиц «Тэватрон» (США)	Открытие топ-кварка – самого тяжелого кварка (1995)	120 миллионов долларов США
3.	Нейтринный детектор SNO (Садбери, Канада)	Открытие осцилляций нейтрино (2000), руководитель проекта - Артур Макдональд (Нобелевская премия 2015 г.)	270 миллионов канадских долларов
4.	Нейтринный детектор «Супер-	Открытие осцилляций нейтрино (1998), руководитель проекта -	100 миллионов долларов США

	Камиоканде» (Япония)	Кадзита Такааки (Нобелевская премия 2015 г.)	
5.	Большой адронный коллайдер (Европа)	Открытие бозона Хиггса (2011), предсказатели бозона - Питер Хиггс, Франсуа Энглер (Нобелевская премия, 2013 г.)	7,8 миллиардов долларов США
6.	Проект LIGO (проект гравитационно- волновой обсерватории, США)	Открытие гравитационных волн (2015), руководители проекта - Кип Торн, Райнер Вайсс, Барри Бариш (Нобелевская премия 2017 г.)	365 миллионов долларов США
7.	Орбитальный телескоп «Хаббл» (запущен в 1990 г.),	Подтверждена теория о сверхмассивных черных дырах в центрах галактик	2,5 миллиардов долларов США
8.	Орбитальный телескоп «Комптон» (запущен в 1991 г.),	Обнаружение более 3000 гамма- всплесков, что приближает к построению теории этих всплесков	617 миллионов долларов США
9.	Орбитальный телескоп «Чандра» (запущен в 1999 г.),	Доказательство существования темной материи (2006)	1,65 миллиарда долларов США
10.	Орбитальный телескоп «Спитцер» (запущен в 2003 г.),	Прямое наблюдение экзопланет, а именно «горячих Юпитеров» (2005)	720 миллионов долларов США
11.	Орбитальный телескоп «Кеплер» (запущен в 2009 г.),	Открытие 3500 кандидатов в планеты	600 миллионов долларов США

7. Аргументы Р.Пенроуза о «невычислимости» творческого мышления

В 1989 г. английский физик и математик Роджер Пенроуз опубликовал книгу «Новый ум короля», которая впервые издана на русском языке в 2003 г. [24]. В данной книге Р.Пенроуз рассмотрел основные принципы, которыми руководствуются специалисты, разрабатывающие вычислительные машины и преследующие цель создать искусственный интеллект. Эти принципы он сопоставил с тем, что нам известно относительно особенностей (закономерностей) человеческого творчества. Р.Пенроуз задался вопросом: возможно ли описать алгоритмом (детерминированным вычислительным процессом) творческую деятельность человека, в ходе которой он создает нечто новое и общественно значимое: научные открытия, технические изобретения и т.д.? Ученый ответил на этот вопрос отрицательно. Далее он поставил вопрос: может ли искусственный интеллект, действующий в рамках программы, в которой нет ничего, кроме детерминированных алгоритмов, сравняться с человеком или превзойти его в своих мыслительных (познавательных) способностях? На этот вопрос он также ответил отрицательно. Как ни удивительно, для формулировки этих ответов ему хватило двух математических результатов: теоремы Геделя о неполноте и теоремы Тьюринга о неразрешимости проблемы остановки. Какая связь может существовать между этими теоремами и разработками в области искусственного интеллекта? Оказывается, самая непосредственная!

Когда ученые создавали первые вычислительные машины, они пришли к выводу, что лучший способ достичь цели – заложить в «мозг» машины программу, которая представляла бы собой набор четких инструкций, совокупность недвусмысленных правил, определяющих порядок обработки информации в ходе решения той или иной задачи. Наибольшее распространение получили вычислительные машины, чье программное

обеспечение можно назвать «дедуктивным». В этих компьютерах инструкции (команды) соответствуют фиксированным правилам вывода некоторой формализованной аксиоматической процедуры. Другими словами, программа этих компьютеров – некая формальная, аксиоматико-дедуктивная система, способ построения которой глубоко изучали Д.Гильберт и представители его математической школы.

Анализируя возможности этих дедуктивных вычислительных машин, Р.Пенроуз пришел к совершенно правильному выводу, что они (эти возможности) ограничены так же, как и сами формальные системы, олицетворяющие стремление своих создателей превратить творческий поиск в «механический процесс». Аналогия между формальными системами (которые изучались сторонниками Д.Гильберта) и дедуктивными компьютерными программами привела Р.Пенроуза к достаточно простой мысли. Коль скоро теорема Геделя о неполноте и теорема Тьюринга о неразрешимости проблемы останковки показали неосуществимость программы формализации математики, предложенной Д.Гильбертом, те же математические результаты демонстрируют «ущербность» дедуктивных вычислительных машин, их неспособность вести полноценный творческий поиск.

Кроме того, Р.Пенроуз установил эквивалентность формальных систем и детерминированных алгоритмов. На высоком уровне математической строгости он показал, что для случая достаточно богатой формальной системы Φ мы имеем простое соотношение: алгоритм $T \rightarrow$ правила формальной системы Φ . Детальное изложение схемы рассуждений, использованных Р.Пенроузом при определении этой эквивалентности, можно найти в [25]. Указанная эквивалентность стала «плацдармом», используя который Р.Пенроуз постулировал, что творческое мышление человека нельзя описать как реализацию детерминированных алгоритмов, а деятельность машин,

основу программ которых составляют те же алгоритмы (формальные системы), - как «разумную» деятельность.

Науке повезло в том, что Р.Пенроуз – хороший математик. Именно он, используя современные математические средства (геометрию пространства-времени Шварцшильда), в 1965 г. строго доказал возможность гравитационного сжатия массивных звезд до сингулярного состояния. Это доказательство принесло ему совсем недавно (в 2020 году) Нобелевскую премию по физике. Занимаясь проблемами искусственного интеллекта, Р.Пенроуз обратил внимание на то, что эффективный алгоритм – это алгоритм, основанный на рекурсивных функциях. Ученый также знал, что рекурсивные функции являются стержнем теории вычислимости: объект, который можно представить в виде рекурсивных функций, может быть легко вычислен. Отсюда он сделал вывод, с которым трудно поспорить: поскольку творческое мышление не описывается детерминированными алгоритмами (рекурсивными функциями), то оно является «невычислимым».

8. Стивен Смейл формулирует 18-ю проблему

В 1995 г. должность вице-президента Международного математического союза занял Владимир Игоревич Арнольд, создатель знаменитой КАМ-теории, ученик А.Н.Колмогорова. Находясь в этой должности, он разослал крупным математикам письмо с предложением охарактеризовать важные математические проблемы, остающиеся пока нерешенными. Отвечая на письмо В.И.Арнольда, американский математик, внесший вклад в теорию динамических систем, Стивен Смейл (род. 1930 г.) представил свой список проблем математики, решение которых, по его мнению, должно способствовать ее дальнейшему прогрессу. Последней (восемнадцатой) в этом списке является проблема, которая звучит следующим образом: каковы пределы интеллекта – как искусственного, так и человека?

В 1997 г. по случаю 60-летия В.И.Арнольда Стивен Смейл выступил в Филдсовском институте (Торонто) с лекцией «Математические проблемы следующего столетия» [26]. Поясняя свою восемнадцатую проблему о пределах интеллекта, он говорит: «Пенроуз пытается привести некоторые ограничения для искусственного интеллекта. Фигурирующий в его доказательстве интересный вопрос – это неразрешимость множества Мандельброта и выводы из теоремы Геделя о неполноте. Однако необходимо более широкое изучение, которое включало бы более глубокие модели разума, а также компьютера...» [26, с.297].

Ссылка С.Смейла на множество Мандельброта связана с тем, что Р.Пенроуз рассматривал это множество в своей книге [24] в качестве одного из объектов, обладающих фантастической сложностью. В частности, он писал: «...Сложную структуру множества Мандельброта во всех ее деталях не под силу охватить никому из нас, и ее невозможно полностью отобразить на компьютере» [24, с.87]. Возможно, Р.Пенроуз считал, что сложность множества Мандельброта – некая аналогия, пусть и не совсем точная, сложности человеческого сознания.

Текст лекции С.Смейла [26] говорит о том, что он ознакомился с книгой Р.Пенроуза «Новый ум короля» [24] и серьезно воспринял его аргументы относительно того, что теоремы Геделя и Тьюринга – реальные факторы, ограничивающие формализацию человеческого творчества. Эти же теоремы показывают, что одних детерминированных алгоритмов (формальных систем) недостаточно для того, чтобы искусственный интеллект приблизился по своим возможностям к человеческому разуму. Однако С.Смейл уверен, что могут существовать и другие факторы, запрещающие полную формализацию (алгоритмизацию) человеческого творчества и искусственного интеллекта. Поэтому американский математик и поставил вопрос: каковы пределы интеллекта – как искусственного, так и человека?

9. Каковы же пределы интеллекта (в интерпретации С.Смейла)?

Разумеется, речь идет о пределах алгоритмизации (формализации) интеллекта. Этими пределами должны быть факторы научного творчества, которые препятствуют превращению творческого поиска в «механический процесс» манипулирования строгими (формальными, детерминированными) алгоритмами. Р.Пенроуз описал два указанных фактора: теорему Геделя о неполноте и теорему Тьюринга о неразрешимости проблемы остановки. Как ни удивительно, другими подобными факторами являются уже рассмотренные нами компоненты индуктивного метода: индукция и аналогия. Обозначив эти компоненты термином «правдоподобные рассуждения», Д.Пойа поясняет [12]: «Доказательное рассуждение надежно, неоспоримо и окончательно. Правдоподобное рассуждение рискованно, спорно и условно. Доказательные рассуждения пронизывают науки как раз в той же мере, что и математика, но сами по себе (как и сама по себе математика) не способны давать существенно новые знания об окружающем нас мире. Всё новое, что мы узнаем о мире, связано с правдоподобными рассуждениями, являющимися единственным типом рассуждений, которым мы интересуемся в повседневных делах. Доказательное рассуждение имеет жесткие стандарты, кодифицированные и выясненные логикой (формальной, или доказательной логикой), являющейся теорией доказательных рассуждений. Стандарты правдоподобных рассуждений текучи, и нет никакой теории таких рассуждений, которая могла бы по ясности сравниться с доказательной логикой или обладала бы сравнимой с ней согласованностью» [12, с.14-15].

Следующий фактор, мешающий формализации творчества, - метод проб и ошибок (метод «грубой силы»). Данный метод не является алгоритмом, который всегда гарантирует получение правильного результата. Тем не менее, он используется настолько часто, что трудно найти открытие, в истории которого не встречались бы элементы метода проб и ошибок (стратегии

перебора). Например, немецкий астроном Иоганн Кеплер (1571-1630), прежде чем установить, что планеты движутся по эллиптическим орбитам, перебрал огромное множество замкнутых кривых, которые могли бы объяснить форму орбит.

Другой пример – работа ученых над проблемой управляемого термоядерного синтеза (УТС). С тех пор, как Андрей Сахаров (1950) предложил удерживать высокотемпературную плазму с помощью магнитного поля, минуло более семидесяти лет. В течение всего этого времени научными лабораториями разных стран испробовано (испытано) колоссальное количество конструкций реакторов, магнитных ловушек, методов нагрева плазмы и т.д. На эксперименты потрачены огромные денежные суммы, но цель пока не достигнута. История УТС – это история масштабного метода проб и ошибок, который, возможно, однажды даст нам практически неисчерпаемый источник энергии.

Прежде, чем описывать очередной фактор научного поиска, вносящий стохастичность в исследовательский процесс и исключающий возможность формализации творчества, вспомним о теории самоорганизации, построенной И.Р.Пригожиным. Ключевым положением данной теории является идея Пригожина о фундаментальной роли случайных флуктуаций в возникновении порядка (вдали от равновесия). В книге «Порядок из хаоса» [27] он в соавторстве с И.Стенгерс отмечает: «Мы уже неоднократно подчеркивали роль флуктуаций. Перечислим кратко наиболее характерные особенности их воздействия на систему. Когда система, эволюционируя, достигает точки бифуркации, детерминистическое описание становится непригодным. Флуктуация вынуждает систему выбрать ту ветвь, по которой будет происходить дальнейшая эволюция системы. Переход через бифуркацию – такой же случайный процесс, как бросание монеты» [27, с.156]. Далее И.Пригожин выявляет глобальную роль флуктуаций: «Флуктуации определяют глобальный исход эволюции системы. Вместо того чтобы

оставаться малыми поправками к средним значениям, флуктуации существенно изменяют средние значения. Ранее такая ситуация нам не встречалась. Желая подчеркнуть ее новизну, мы предлагаем назвать ситуацию, возникающую после воздействия флуктуации на систему, специальным термином – порядком через флуктуацию» [27, с.157].

Аналогом этих случайных флуктуаций, порождающих явления самоорганизации, являются случайные научные открытия. Неожиданные (непреднамеренные) находки постоянно сопровождают поисковую деятельность. История науки изобилует примерами таких находок (незапланированных успехов). Как правило, подобные открытия совершаются в ситуациях, когда: 1) ученый искал одно, а нашел другое (эпизоды «серендипити»); 2) ученый нашел то, что искал, но, тем не менее, при совершенно неожиданных обстоятельствах, поскольку не знал (и не мог знать) заранее, какие конкретные экспериментальные условия приведут к достижению цели.

Примером научных успехов первого типа является эксперимент Христиана Эрстеда (1820), в котором была впервые обнаружена связь между электрическими и магнитными явлениями. А.С.Майданов в монографии «Методология научного творчества» [28] констатирует: «Свое великое открытие Эрстед сделал благодаря тому, что во время опыта, в котором он хотел продемонстрировать студентам способность электричества нагревать проволоку, **случайно** на нужном, вполне определенном расстоянии от проволоки и в определенном положении к ней оказалась магнитная стрелка. К этому прибавилась еще наблюдательность одного зоркого студента, который также случайно в нужный момент посмотрел на компас и заметил, что стрелка поворачивается» [28, с.349].

Пример успехов второго типа – открытие эффекта электромагнитной индукции Майклом Фарадеем (1831). М.Фарадей пришел к мысли о существовании этого эффекта по аналогии с экспериментом Х.Эрстеда. Но для

того, чтобы подтвердить свою мысль, ему понадобилось 11 лет настойчивых поисков. За это время он перебрал множество комбинаций проводников, спиралей, сердечников и магнитов. Наконец, в одном из опытов он случайно заметил, что стрелка гальванометра в цепи вторичной обмотки скачкообразно отклоняется от нулевого положения при включении или отключении батареи. Е.А.Седов [15] пишет: «Фарадей **случайно** заметил кратковременное отклонение стрелки прибора в момент подключения источника питания к изолированной от цепи прибора (первичной) обмотке. Этого было достаточно для установления закона электромагнитной индукции, существование которого Фарадей предвидел, но не мог подтвердить опытом в течение десяти лет» [15, с.157].

Теперь мы можем перечислить ключевые аспекты творчества, позволяющие ответить на вопрос С.Смейла о пределах алгоритмизации интеллекта – как искусственного, так и человека. Это, прежде всего: 1) теорема Геделя о неполноте; 2) теорема Тьюринга о неразрешимости проблемы остановки; 3) правдоподобные рассуждения, описанные Д.Пойа (в первую очередь индукция и аналогия); 4) метод проб и ошибок; 5) фактор случая в научном открытии.

10. Методы машинного обучения и статистическая физика

Многие специалисты, занятые разработкой «интеллектуальных» вычислительных машин, уже осознали ограниченность формальных систем и начинают использовать новые методы конструирования подобных машин. Классические экспертные системы, основанные на принципах дедуктивной обработки информации, уступают свое место интеллектуальным устройствам, в которых воплощаются принципы индуктивного обучения. Искусственные нейронные сети (ИНС), когда-то отвергнутые Марвином Минским, стремительно развиваются. Появились технологии многослойных (глубоких)

нейросетей, а вместе с ними понятие «глубокого обучения», которое составляет основу раздела науки под названием «машинное обучение».

В этот раздел науки стали проникать методы статистической физики (подобно тому, как в свое время они проникли в теорию информации и концепцию самоорганизации). Началом этой экспансии послужило открытие Джона Хопфилда (1982), который обнаружил аналогию между нейронными сетями и спиновыми стеклами – магнитными веществами с аморфной неупорядоченной структурой. В результате Хопфилд смог привлечь к анализу нейросетевых моделей мощный математический аппарат статистической физики [29, 30, 31]. Чуть позже была обнаружена аналогия между кибернетическими задачами оптимизации и методом «имитации отжига» в тех же спиновых стеклах [32].

Как отмечено выше, открыв статистическую природу второго начала термодинамики, Л.Больцман (1871) связал энтропию с вероятностью состояния системы (позже М.Планк выразит эту связь формулой $S = \ln W$). Но еще в 1868 г. Л.Больцман открыл в статистической механике распределение, ныне называемое «распределением Больцмана». Это распределение вероятностей (или вероятностная мера), которое дает вероятность того, что система будет находиться в определенном состоянии как функция энергии этого состояния и температуры системы. Как ни удивительно, этот результат был перенесен в область машинного обучения (в область конструирования многослойных нейронных сетей). Сделал это Джеффри Хинтон – один из лидеров технологии глубоких нейронных сетей, праправнук Джорджа Буля (1815-1864), изобретателя логического исчисления. П.Домингос в книге [31] пишет: «В 1985 году исследователи Дэвид Окли, Джеффри Хинтон и Терри Сейновски заменили детерминистские нейроны в сетях Хопфилда вероятностными. Нейронная сеть получила вероятностное распределение по своим состояниям, и состояния высокой энергии стали экспоненциально менее вероятны, чем низкоэнергетические. Вероятность нахождения сети в

конкретном состоянии была задана хорошо известным в термодинамике распределением Больцмана, поэтому ученые называли свою сеть машиной Больцмана» [31, с.126-127].

В настоящее время машины Больцмана упоминаются практически во всех книгах, посвященных изложению принципов машинного обучения. Так, Ян Гудфеллоу и другие авторы [33] отмечают: «Начиная с 2009 года, ученые применили к распознаванию речи вариант глубокого обучения на базе обучения без учителя. В основе этого подхода лежало применение неориентированных вероятностных моделей, называемых ограниченными машинами Больцмана...» [33, с.386]. Аналогично, С.Николенко и соавторы [34] указывают: «В середине 2000-х годов появились первые действительно хорошо работающие и хорошо масштабирующиеся конструкции... Решение, которое предложили в группе Хинтона [223], заключалось в том, чтобы предобучать нейронные сети уровень за уровнем с помощью специального случая ненаправленной графической модели, так называемой ограниченной машины Больцмана...» [34, с.121]. Здесь [223] – публикация Дж. Хинтона и соавторов (2006).

Завершая статью, сравним два высказывания, одно из которых касается неинтегрируемости большинства динамических систем, доказанной А.Пуанкаре, а другое – невозможности достичь полной формализации науки (полного исключения элементов стохастичности из методов получения и верификации научного знания). Автор первого высказывания И.Пригожин [35] пишет: «Стоит остановиться на минуту и поразмыслить над фундаментальным результатом Пуанкаре. Предположим, что Пуанкаре удалось бы доказать интегрируемость всех динамических систем. Это означало бы, что все динамические движения по существу изоморфны движению свободных (не взаимодействующих) частиц! Для когерентности и самоорганизации просто не было бы места. В интегрируемом мире не нашлось бы места и для жизни» [35, с.102-103].

Следующее высказывание принадлежит американскому математику Грегори Чейтину (Gregory Chaitin), автору алгоритмической теории информации. В статье [36] он обратил внимание на то, что в мире формальных систем не нашлось бы места для творчества: «Если бы Гильберт оказался прав, то математика была бы замкнутой системой, в которой нет места новым идеям. Существовала бы статичная замкнутая теория, объясняющая в математике всё, и это было бы похоже на диктатуру. Чтобы математика развивалась, нужны новые идеи и простор для творчества» [36, с.44].

11. Заключение

Таким образом, сопоставление результатов теории хаоса и концепции самоорганизации с результатами, полученными учеными в попытках описать закономерности творческой деятельности (прежде всего, научного поиска), позволяет выявить многочисленные аналогии между этими сферами знания. Можно констатировать существование определенной эквивалентности (изоморфизма) между основными принципами теории хаоса, теории самоорганизации и теории творчества (теории научного поиска). Наиболее очевидный пример этой эквивалентности – стохастичность развития динамических систем (в том числе возникновения порядка в сложных системах) и стохастичность интеллектуальных процедур (творческих стратегий), используемых в процессе научного поиска. Примечательно, что стохастичность творческих стратегий позволяет решить 18-ю проблему С.Смейла, т.е. ответить на вопрос: каковы пределы интеллекта – как искусственного, так и человека?

Литература:

1. Диаку Ф., Холмс Ф. Небесные встречи. Истоки хаоса и устойчивости. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. – 304 с.
2. Стюарт И. Величайшие математические задачи. – М.: «Альпина нон-фикшн», 2015. – 460 с.
3. Данилов Ю.А. Прекрасный мир науки. – М.: «Прогресс-Традиция», 2008. – 383 с.
4. Чириков Б.В. Резонансные процессы в магнитных ловушках // Атомная энергия. – 1959. - Том 6. - № 6. – С.630-638.
5. Бурбаки Н. Очерки по истории математики. – М.: «КомКнига», 2007. – 296 с.
6. Мысль и страсть Ильи Пригожина // Химия и жизнь. – 2004. - № 2. – С.3-31.
7. Глушков В.М. Развитие абстрактного мышления и запрет Геделя // Глушков В.М. Кибернетика. Вопросы теории и практики. – М.: «Наука», 1986. – С.133-143.
8. Паршин А.Н. Размышления над теоремой Геделя // Историко-математические исследования. – 2000. - № 5 (40). – С.26-55.
9. Пригожин И.Р. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 288 с.
10. Поспелов Д.А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов. – М.: изд-во «Радио и связь», 1989. – 184 с.
11. Майоров Г.Г. Лейбниц как философ науки // Лейбниц Г. Сочинения в четырех томах. Том 3. – М.: изд-во «Мысль», 1984. – С.3-40.
12. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения. – М.: «Наука», 1975. – 464 с.
13. Рассел Б. Человеческое познание: его сфера и границы. – М.: «Республика», 2000. – 464 с.

14. Гельфер Я.М. История и методология термодинамики и статистической физики. – М.: «Высшая школа», 1981. – 536 с.
15. Седов Е.А. Одна формула и весь мир. – М.: «Знание», 1982. – 176 с.
16. Tribus M. Information theory as the basic for thermostatics and thermodynamics // Journal of Applied Mechanics. – 1961. – Vol.28 (3). – P.1-8.
17. Мартюшев Л.М. Принцип максимума производства энтропии: история возникновения и современное состояние // Успехи физических наук. – 2021. – Том 191. - № 6. – С.586-613.
18. Фрадков А.Л., Шалымов Д.С. Законы эволюции нестационарных процессов, подчиняющихся принципу максимума энтропии // Труды СПИИРАН. – 2014. - № 3 (34). – С.14-32.
19. Вьюгин В.В., Маслов В.П. Распределение инвестиций на фондовом рынке, информационные типы и алгоритмическая сложность // Проблемы передачи информации. – 2006. - Том 42. - № 3. - С.97-108.
20. Поплавский Р.П. Демон Максвелла и соотношения между информацией и энтропией // Успехи физических наук. – 1979. – Том 128. - № 1. – С.165-176.
21. Френкель В.Я., Явелов Б.Е. Эйнштейн: изобретения и эксперимент. – М.: «Наука», 1990. – 239 с.
22. Kirkaldy J.S. Thermodynamics of the human brain // Biophysical Journal. – 1965. - Vol.5 (6). - P.981-986.
23. Азимов А. Путеводитель по науке. От египетских пирамид до космических станций. – М.: «Центрполиграф», 2006. – 788 с.
24. Пенроуз Р. Новый ум короля. О компьютерах, мышлении и законах физики. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 384 с.
25. Ершов Ю.Л., Целищев В.В. Алгоритмы и вычислимость в человеческом познании. – Новосибирск: изд-во СО РАН, 2012. – 504 с.
26. Смейл С. Математические проблемы следующего столетия // сборник «Современные проблемы хаоса и нелинейности». – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – С.280-303.

27. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. – М.: «КомКнига», 2005. - 296 с.
28. Майданов А.С. Методология научного творчества. – М.: изд-во «ЛКИ», 2008. – 512 с.
29. Мазин И.И., Фейгельман М.В. Спиновое стекло как модель мозга // Природа. – 1986. - № 2. – С.103-104.
30. Кинцель В. Спиновые стекла как модельные системы для нейронных сетей // Успехи физических наук. – 1987. – Том 152. - № 1. – С.123-131.
31. Домингос П. Верховный алгоритм: как машинное обучение изменит наш мир. – М.: изд-во «Манн, Иванов и Фербер», 2016. – 336 с.
32. Мазин И.И. «Имитация отжига» - новый метод численного моделирования // Природа. – 1987. - № 7. – С.76-79.
33. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. – М.: изд-во «ДМК Пресс», 2018. – 652 с.
34. Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб.: «Питер», 2018. – 480 с.
35. Пригожин И., Стенгерс И. Время. Хаос. Квант. К решению парадокса времени. – М.: «КомКнига», 2005. – 232 с.
36. Чейтин И. Пределы доказуемости // В мире науки. – 2006. - № 6. – С.38-45.

Приложение

Таблица 2. Аналогии между теорией хаоса, теорией самоорганизации и теорией творчества (научного поиска)

№	Идея (открытие) в теории хаоса и самоорганизации	Идея (открытие) в теории творчества, в том числе в области машинного обучения
1.	Ошибка Анри Пуанкаре (первоначальная идея об интегрируемости большинства динамических систем)	Ошибка Давида Гильберта (уверенность в осуществимости полной формализации науки)
2.	Принцип открытости самоорганизующихся систем Бергаланфи - Пригожина	Теорема Геделя о неполноте, теорема Тьюринга о неразрешимости проблемы остановки
3.	Принцип роста энтропии в открытых системах (Р.Клаузиус) и идея о статистической природе этого роста (Л.Больцман)	Введение понятия энтропии в теорию информации, т.е. теорию связи (Клод Шеннон), описание энтропии индуктивного вывода (Э.Т.Джейнес)
4.	Неинтегрируемость большинства динамических систем (А.Пуанкаре), невозможность точного математического описания явлений самоорганизации (И.Пригожин)	Формулировка идеи о вероятностной природе индуктивного вывода, о невозможности предсказать (определить) степень справедливости результатов неполной индукции (Б.Рассел, Д.Пойа)
5.	Идея о том, что случайные (хаотические) флуктуации способны породить порядок (Илья Пригожин)	Идея том, что существенную роль в прогрессе науки играют случайные научные открытия (Э.Мах, Д.Кэмпбелл)
6.	Открытие непредсказуемости траекторий системы с элементами хаоса, невозможности точного предсказания (Э.Н.Лоренц, Б.В.Чириков)	Невычислимость мышления человека, невозможность представить творческие стратегии нашего интеллекта в форме однозначных детерминированных алгоритмов (Р.Пенроуз)

7.	Идея о том, что в мире интегрируемых динамических систем не нашлось бы места для жизни (И.Пригожин)	Идея о том, что в мире замкнутых формальных алгоритмов невозможен процесс творчества (Г.Чейтин),
8.	Случайное блуждание траектории системы внутри определенной области фазового пространства	Метод проб и ошибок, в ходе которого осуществляется полный перебор вариантов
9.	Математические методы теории хаоса и самоорганизации (в том числе статистической физики)	Математические методы теории многослойных нейронных сетей (машинного обучения)