Образ учителя. Десять лет спустя

Сергей Павлович Курдюмов

Жизнь ведь тоже только миг,
Только растворенье
Нас самих во всех других
Как бы им в даренье.

Б. Пастернак

Время проходит, меняются задачи, появляются новые проблемы, и в соответствии с этим становится иным взгляд на прошлое. Кроме того, формируется новый образ будущего, стратегии и цели развития. Поэтому при самом добросовестном отношении к знанию, истине и науке историю вновь и вновь переписывают, чтобы осмыслить вчерашний день с позиции завтрашнего.

Выдающийся специалист по прикладной математике, междисциплинарным исследованиям, философии и методологии науки, член-корреспондент РАН, мой учитель, Сергей Павлович Курдюмов говаривал по этому поводу: «Будущее временит настоящее и проясняет прошлое». Кроме того, приходят следующие поколения, которым хочется передать результаты, надежды, мечты предыдущих и которых, если получится, уберечь от уже сделанных ошибок.

Именно с этих позиций сейчас хотелось бы взглянуть на научное творчество С.П. Курдюмова, на идеи, которые выдвигал он сам и которые сейчас развивает его научная школа.

О личности Сергея Павловича, о его взглядах на жизнь, науку,

Автор

Малинецкий Георгий Геннадьевич — заведующий отделом Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, доктор физико-математических наук, профессор.

будущее замечательно рассказывает книга воспоминаний о нем, которую успела подготовить писательница Зоя Журавлева [1]. Сергей Павлович со школьных лет вел подробные дневники, где впечатления и раздумья перемежались с формулами. Зоя Журавлева настояла, чтобы эти дневники, писавшиеся наскоро, были расшифрованы, и часть их была представлена в этих воспоминаниях.

О многом проще сказать «от первого лица». Сергей Павлович, размышляя, перечитывал записи, сделанные им в разные годы. «Удивительно, но одни и те же мысли приходили и возвращались вновь и вновь, начиная со школьных лет», — несколько раз говорил он мне. Казалось бы, внешние события его большой жизни уже описаны. На 70-летнем рубеже он задумался, какие из его работ и идей хотелось бы «передать в будущее». Поэтому мы подготовили сборник «главных работ» научной школы с комментариями к ним [2], который потом издавался и переиздавался.

Сергей Павлович умел «любить науку в себе, а не себя в науке» и обычно радовался успехам и достижениям учеников и коллег больше, чем своим. Он считал, что мы делаем общее дело, работаем на будущее и что самое главное и интересное впереди. Когда мы получили тираж этого сборника, он сразу подарил больше трех десятков экземпляров своим коллегам, друзьям и ученикам. Подписывая книги, он не только адресовал теплые слова, но и там же написал каждому задачу, которую очень важно было бы решить в будущем. Каждому свою. Сергей Павлович был очень щедрым человеком — он с удовольствием дарил свое внимание, мысли, время, идеи и задачи тоже.

Прикладная математика играет очень важную творческую роль в процессе познания.

После смерти В.Б. Уварова, коллеги и друга С.П. Курдюмова, специалиста по уравнениям состояния, крайне важным при моделировании ядерных взрывов и в задачах астрофизики, ученики издали монографию, посвященную развивавшимся им идеям. «Продолжить дело ученого, пойти дальше, превзойти его — это и есть лучший памятник ему. Дело его надо продолжать, а не мраморные глыбы ставить!» — с воодушевлением говорил Сергей Павлович.

Поэтому, наверно, стоит рассказать о нескольких главных идеях Сергея Павловича, об «инвариантах» его научного творчества, к которым он возвращался вновь и вновь на своем жизненном пути.

Хотя этот текст рассчитан «на всех», в нем иногда будут встречаться формулы. Мы как-то обсуждали с Сергеем Павловичем план и стиль одной из наших научно-популярных брошюр и уместность в ней формул. Я приводил ему слова выдающегося физика и блестящего популяризатора Стивена Вайнберга: «Каждая формула в научно-популярной книге уменьшает число читателей книги вдвое» и отстаивал «текст без формул». «Для математиков, физиков, естественников формулы выразят проще, точнее и конкретнее то, что мы хотим. Гуманитариям мы расскажем то же самое, но формулы напомнят им, что есть и другой язык. И это сила, а не слабость», — возражал мне Сергей Павлович.

По его инициативе и при самом активном участии Зои Журавлевой и ассоциации «Женщины в науке и образовании» была организована целая серия замечательных конференций на тему: «Языки науки, языки искусства». Поэтому формулы иногда будут попадаться.

Сергей Павлович был одним из основоположников *теории самоорганизации* или *синергетики* (от греческого — совместного действия) — междисциплинарного подхода, который активно развивается в отечественной и мировой науке с 1970-х годов. Его исследования и работы его научной школы получили мировое признание.

Однако, как говорили восточные мудрецы, которых любил вспо-

минать Сергей Павлович: «Сначала мы выбираем Путь, а потом Путь выбирает нас». Применительно к науке это означает, что мировоззрение, идеи и мечты в большой степени определяются задачами, решаемыми исследователем.

Прикладная математика как основа мировоззрения

Природа смеется над трудностями интегрирования.

П.С. Лаплас

Вся научная жизнь Сергея Павловича прошла в Институте прикладной математики (ИПМ) АН СССР, а позже в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Этот институт был создан в 1953 г. выдающимся советским математиком, механиком, организатором науки, академиком Мстиславом Всеволодовичем Келдышем для решения стратегических задач, стоявших перед страной, которые требовали математического моделирования и компьютерных расчетов. Институт сыграл огромную роль в реализации советских ядерного и космического проектов. Благодаря этим проектам нынешняя Россия существует как суверенное государство.

Срочная важная работа на переднем крае науки требовала квалифицированных, самоотверженных, талантливых людей. С другой стороны, именно работа над такими задачами помогала выращивать выдающихся ученых, позволяла создавать новые области науки, порождала новые идеи и необычный взгляд на мир.

Чтобы понять новое, естественно сравнить его со старым. Основным инструментом в институте, где работал Сергей Павлович и которым позже руководил, была прикладная математика. Наверно, с нее и стоит начать.

В XX в. произошла важная *бифуркация* в развитии науки. Напомним, что бифуркация (от французского *bifurcation* — раздвоение, ветвление) в строгом смысле — это изменение числа и (или) устойчивости решений определенного вида при варьировании параметров. В более широком смысле, и в гуманитарных науках, и в массовом сознании, с этим понятием связывается ситуация, в которой предыдущая траектория системы теряет устойчивость и появляются новые возможности для развития, другие траектории.

Математика едина, но в XIX веке сначала неявно, а затем явно произошло разделение на теоретическую и прикладную математику. Дело в том, что в XVIII веке ученые не обращали особого внимания на строгость доказательств, на теоремы существования и единственности. Член Санкт-Петербургской академии наук Леонард Эйлер полагал, что работа ученого — делать выкладки, а их строгое обоснование — дело второстепенное. Однако Коши, Вейерштрасс, другие ученые столкнулись с парадоксами, возникающими при переходе к пределу в ряде задач математического анализа, а позже и с логическими задачами, не имеющими убедительных, очевидных решений. Требования к строгости возросли. Стало ясно, что прежде, чем вычислить ответ, надо доказать, что решение задачи существует и оно единственно. Это потребовало больших усилий и работы многих талантливых людей.

С другой стороны, потребности техники, физики, механики, астрономии ставили множество сложных проблем. При этом приходилось применять различные приближенные методы, уточнять постановку задач, самым активным образом взаимодействовать со специалистами, которым нужно решение.

Леонард Эйлер

Например, авиационная и космическая техника, судостроение и множество задач, связанных с обороной, требуют описания движения вязкой жидкости или газа. Классической моделью, описывающей такое движение, является выведенное столетия назад уравнение Навье — Стокса. Однако у нас до сих пор нет доказательств существования и единственности решений этого замечательного уравнения в трехмерной постановке. Именно в такой постановке можно описывать сложные, хаотические — турбулентные — движения жидкости и множество других важных и интересных явлений. И это уравнение нельзя «отложить на потом». Надо строить более простые модели, учиться считать их на компьютере, сопоставлять вместе со специалистами-гидродинамиками с экспериментом, уточнять модели и т.д. Именно этим и занимается прикладная математика.

Иногда шутят: «Теоретическая математика делает то, что можно, так, как нужно, а прикладная — то, что нужно, так, как можно».

Отсюда появляются и два взгляда на математические науки, отличающиеся расстановкой акцентов. Первый взгляд очень точно определил математик и популяризатор науки В.А. Успенский [3]: «Автору очень хочется сказать, что математика — единственная

наука, где достигается абсолютная истина, но он все же на это не решается, так как подозревает, что абсолютность истины не достигается нигде. Но в любом случае математические истины ближе к абсолютным, чем истины других наук. Поэтому математика — наилучший полигон для тренировки на истину. Истина — основной предмет математики».

Такая трактовка широко распространена на механико-математическом факультете МГУ. Студенты других факультетов часто в шутку называют мехматян носителями высшего знания.

Да и, собственно, о какой истине мы говорим? Только в классической философии есть две принципиально различные концепции истины. Одна из них основывается на принципе корреспонденции как соответствия знания объективному положению дел предметного мира (Аристотель, Ф. Бэкон, Дидро, Фейербах, Ленин). Другая — на принципе когеренции как соответствия знания характеристикам содержания идеальной сферы: Абсолюта (Платон, Гегель и др.), врожденным когнитивным структурам (Августин, Декарт), априорным формам (Кант), интерсубъективным конвенциям,

Н.И. Лобачевский

соглашениям (А. Пуанкаре) и т.д. В постмодерне рассматриваются «игры истины в отношении индивидуума к самому себе» (Фуко). Тот же философ рассматривал «историю истины» как создание «такой истории, которая была бы не историей того, что может быть истинного в знаниях, а анализом «игр истины», игр истинного и ложного, игр, через которые бытие исторически конструирует себя как опыт, то есть как то, что может и должно быть помыслено» [4]. Как видим, и с «истиной» не все просто. Другим любимым утверждением «теоретических математиков» является положение, что «математика — это язык» и «сфера творчества».

И действительно, после открытия Н.И. Лобачевским первой неевклидовой геометрии, а впоследствии и множества других, после создания в XX веке нескольких вариантов математического анализа (например, в нестандартном анализе вводится отдельное пространство «бесконечно малых чисел», отличных от всех других) стало ясно, что разных «математик» может быть много. И здесь уместна трактовка математики как «науки о возможных мирах», данная Вильгельмом Лейбницем.

Однако эта произвольность открывает возможность для творчества. Поэтому, к примеру, во многих американских университетах математические факультеты находятся в отделениях изящных искусств. Но есть и совершенно другой взгляд на математику, делающий акцент на прикладном аспекте этой дисциплины.

В данном контексте первична именно прикладная, а не теоретическая математика. Именно так смотрел на науку, которой занимался, Сергей Павлович.

Этот взгляд очень точно выразил выдающийся российский исследователь академик Владимир Игоревич Арнольд — представитель теоретической математики: «Вся математика делится на три части: криптография (оплачиваемая ЦРУ, КГБ и им подобными), гидродинамика (поддерживаемая производителями атомных подводных лодок) и небесная механика (финансируемая военными и другими организациями типа НАСА, имеющими отношение к ракетам).

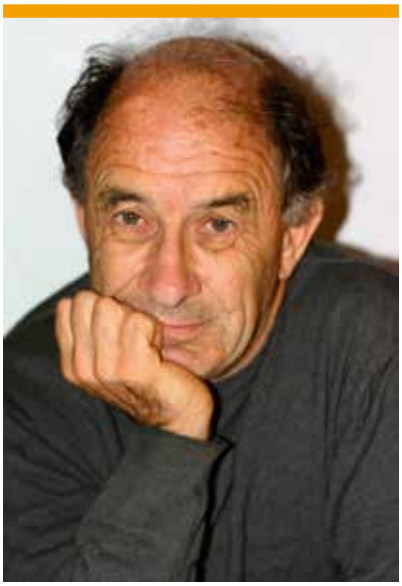
Криптография привела к созданию теории чисел, алгебраической геометрии над конечными полями, алгебры[1], комбинаторики и компьютеров.

Гидродинамика породила комплексный анализ, уравнения в частных производных, теорию групп и алгебр Ли, теорию когомологий и методы вычислений.

Небесная механика дала начало теории динамических систем, линейной алгебры, топологии, вариационному исчислению и симплектической геометрии.

Существование таинственных связей между всеми этими различными областями — самая поразительная и прекрасная сторона математики (не имеющая никакого разумного объяснения)» [5].

С.П. Курдюмов и В.И. Арнольд были знакомы, относились с симпатией друг к другу и даже говорили о совместных исследованиях, но не успели. В свое время в Московском физико-техническом институте (МФТИ), в котором Сергей Павлович много лет преподавал, а затем заведовал кафедрой прикладной математики, была вакансия на должность заведующего кафедрой математики. На нее претендовал В.И. Арнольд — исследователь с мировым именем. К сожалению, ученый совет отклонил эту кандидатуру, о чем Сергей Павлович не раз с сожалением вспоминал. В.И. Арнольд не раз говорил, что математика — часть физики.



В.И. Арнольд

Этих исследователей многое связывало и по существу, в научном пространстве. Оба считали, что главным действующим лицом математики, естествознания, да и науки в целом, будет *нелинейность*. Сергей Павлович часто говорил на своих лекциях: «Мы вступили с вами в новый мир — мир нелинейных процессов».

Для линейных уравнений справедлив *принцип суперпозиции* (наложения), встречающийся нам постоянно, начиная со школьной программы, где он упоминается в связи с законом Кулона. Благодаря принципу суперпозиции через наш радиоприемник одновременно приходят сигналы тысяч радиостанций, не мешая друг другу, и мы можем их поймать, покрутив ручку настройки.

Если L — линейный оператор, то в соответствии с принципом суперпозиции

$$L(\alpha u + \beta v) = \alpha L u + \beta L v. \qquad (1)$$

Или «на гуманитарном языке» — в линейном мире действие совокупности причины 1 и 2 является обычной арифметической суммой результатов причины 1 (как будто второй не существует) и 2 (как будто не существует первой). Именно принцип суперпозиции позволяет «разделять и властвовать», «собирая» общее решение линейной задачи из частных. Иногда математическую физику, которую проходят в университетах, называют «наукой о трех уравнениях» — теплопроводности, Лапласа и колебаний струны —

$$u_t = u_{xx},\ \Delta\varphi = 0,\ v_{tt} - v_{xx} = 0. \qquad (2)$$

С нелинейными уравнениями, которыми занимался Сергей Павлович, все гораздо сложнее и интереснее. Он часто говорил примерно так: «Мир един, поэтому его главные свойства можно выяснить на самых простых моделях». И приводил такой пример. Уравнение Мальтуса описывает рост популяции N со временем t:

$$\frac{dN}{dt} = \alpha N,\ N(0) = N_0,$$
$$\alpha > 0,\ \Rightarrow N(t) = N_0 e^{\alpha t}. \qquad (3)$$

Его решение — экспонента, она неограниченно растет за бесконечное время (α — постоянная, называемая мальтузианским коэффициентом). Мальтус полагал, что в соответствии с этим законом (в равное число раз за равные промежутки времени) растет численность человечества. И в этом он ошибался.

Однако уже простейшее нелинейное уравнение

$$\frac{du}{dt} = \beta u^2,\ u(0) = u_0,$$
$$\beta > 0 \Rightarrow u(t) = \frac{1}{1/u_0 - \beta t}$$

ведет себя гораздо интереснее. Здесь $u(t)$ стремится к бесконечности за конечное время, называемое временем обострения t_f. И это время существования зависит от начальных данных. Исследования, проведенные профессором Сергеем Петровичем Капицей, показали, что именно по этому, гиперболическому, закону численность человечества росла около миллиона лет. Именно это кардинально отличает нас от всех видов, живущих на Земле. Если бы складывавшаяся в течение сотен тысяч лет тенденция сохранялась, то «временем обострения», когда нас стало бы бесконечно много, был бы 2025 г. (на Западе иногда это время называют точкой сингулярности). Удивительно простое уравнение оказывается содержательным и отражает ключевые вещи, касающиеся каждого из нас. Сергей Павлович был дружен с профессором физтеха выдающимся просветителем и бессменным ведущим передачи «Очевидное — невероятное». По словам С.П. Капицы, именно в ИПМ на семинаре у Сергея Павловича его глобальная демографическая теория впервые нашла понимание и поддержку. Оба они очень ценили совместно написанную монографию [6].

Идеи и понятия, рождающиеся в прикладной математике, становятся элементами культуры, а затем входят в массовое сознание.

В творчестве В.И. Арнольда огромную роль сыграло исследование тоже очень простой модели

$$\varphi_{n+1} = f(\varphi_n) \bmod 2\pi,\ 0 \le \varphi < 2\pi, \qquad (4)$$

задающей отражение окружности (φ — угол) в себя. Несмотря на удивительную внешнюю простоту, эта модель оказалась глубокой и содержательной.

По мнению Сергея Павловича, прикладная математика играет очень важную творческую роль в процессе познания. С одной стороны, исследование свойств нелинейных моделей дает более глубокое понимание явлений в разных областях науки. Оно помогает «увидеть единое во многом».

С другой стороны, это исследование «подсказывает», где следует искать новые, пока не известные явления и сущности. Сергею Павловичу нравилась мысль выдающегося французского математика Анри Пуанкаре о будущем математики, в котором можно будет предсказывать и находить новое на основе анализа общей математической структуры теории, используемой в данной области. В большой степени компьютерное моделирование сделало эту мечту реальностью.

В основе нашего знания и способности разумно и дальновидно действовать лежит умение отделять основное от второстепенного. Но именно это и является главным при построении математических моделей! В ходе создания модели выделяются ключевые факторы и процессы, которые надо описать, и второстепенные, которыми можно пренебречь. Это гораздо больше, чем просто «язык», о котором любят говорить «теоретические математики». Еще Галилео Галилей считал, что книга природы написана языком математики. Сегодня мы можем добавить, что само содержание книги — математические модели, отражающие наиболее важные познанные причинно-следственные связи, характеризующие природу, общество, человека.

Сергей Павлович предвидел, что математика XXI века будет очень сильно отличаться от той, что мы знаем сейчас. В самом деле, главными «заказчиками», «поставщиками задач» в XX веке были механика, физика, отчасти химия. Однако наступившее столетие, вероятно, будет определять развитие наук о человеке и обществе. На авансцену выходят медицина, психология, социология, история, теория управления рисками, нейронаука, исследование различных сетевых структур. Они должны очень многое изменить и в прикладной математике, и в нашем понимании реальности.

В отличие от коллег, считающих, что математическое творчество — дело избранных, своеобразный «спорт» или «игра в бисер», доступная немногим, Сергей Павлович представлял эту область исследований совершенно иначе. По его мысли, это сфера взаимодействия специалистов разного профиля, увлекательная попытка понять, что в разных областях науки является наиболее важным и общезначимым. Он считал, что идеи и понятия, рождающиеся в прикладной математике, становятся элементами культуры, а затем входят в массовое сознание.

И действительно, такие понятия как «точка бифуркации», «динамический хаос», «эффект бабочки», «режимы с обострением», пришедшие из прикладной математики, сейчас фигурируют на страницах газет, в оценках экспертов, в речах политиков.

Сергей Павлович предвидел, что прикладная математика из дисциплины, «обслуживающей»

С.П. Курдюмов и С.П. Капица

другие области науки и сферы жизнедеятельности, превратится в «генератор идей», основу междисциплинарных подходов. И на наших глазах этот прогноз сбывается.

Время и необратимость. На пороге новой революции в физике

Время все еще остается большой загадкой. Оно для нас не более чем общее понятие; мы не знаем даже, существует ли оно.

К. Саймак

Дипломную работу, посвященную теории атомного ядра, на физическом факультете Московского государственного университета Сергей Павлович делал под руководством академика М.А. Маркова. Сформировавшийся в этом время физический стиль мышления, глубокое понимание значения законов природы он пронес через всю жизнь.

Сергей Павлович считал своими учителями основоположника вычислительного эксперимента академика Александра Андреевича Самарского и выдающегося специалиста в области прикладной математики — асимптотического анализа, теории вычислительных алгоритмов, теории некорректных задач — академика Андрея Николаевича Тихонова (которого он сменил на посту директора ИПМ) и относился к ним с глубоким уважением и благодарностью. Важной вехой в истории института, да и всей советской науки, стали расчеты ядерных устройств. Первая советская атомная бомба благодаря огромной физической интуиции, очень удачным математическим моделям и алгоритмам вычислений была рассчитана на логарифмических линейках. Однако совершенствование оружия требовало расчетов, далеко выходящих за пределы возможностей одного специалиста и даже бригады расчетчиков, — нужны были вычислительные машины, компьютерные модели и новое поколение алгоритмов.

Когда А.Н. Тихонов на одном из совещаний рассказал о принципиальной возможности провести прямые численные расчеты ядерных взрывов, выдающийся физик Л.Д. Ландау назвал такую работу «научным подвигом». И такой подвиг был совершен в отделе, которым руководил академик А.А. Самарский. Одним из активных участников всех этих работ был Сергей Павлович. Он мало рассказывал о том времени, хотя ясно осознавал, что главные задачи института были решены именно тогда.

По мнению А.А. Самарского, причина успешной конкуренции, несмотря на отставание в вычислительной технике, с командой американских исследователей, занимавшейся аналогичными задачами, состояла в том, что ядро американской команды составили математики, а советской — физики. Они глубже понимали сущность описываемых процессов и приближения, которые могут быть сделаны при моделировании.

Кроме того, мир уравнений в частных производных, с помощью которых описываются законы природы, очень сильно отличается от «дискретного», «цифрового», в котором работают вычислительные машины. Это разные сущности. Второй мир гораздо беднее, и надо тщательно взвесить, как и какие свойства исходных уравнений следует передать на дискретном уровне. И физики обычно понимают это лучше. Не случайно одним из наиболее развитых разделов компьютерного эксперимента является вычислительная физика.

В физической науке Сергея Павловича волновала проблема стрелы времени, необратимости

С.П. Курдюмов и А.А. Самарский

физических, химических, биологических, социальных процессов.

В судьбе ученого очень важно время, в которое он живет, основное течение научной мысли, или, как сейчас говорят на западный манер, мейнстрим.

Вспомним уравнение Ньютона

$$m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}(\vec{r}) = -\frac{\partial U}{\partial \vec{r}} \Rightarrow \frac{m\dot{\vec{r}}^2}{2} + U(\vec{r}) = E. \quad (5)$$

Его следствием является сохранение энергии E, представляющей сумму кинетической и потенциальной энергий. Кроме того, оно независимо (инвариантно) относительно смены знака времени $t \to -t$. Это означает, что если уравнения Ньютона описывают пулю, вылетающую из ружья, или падающий и разбивающийся стакан, то с таким же успехом этому уравнению удовлетворяет и пуля, влетающая в ружье, и стакан «впрыгивающий» на стол. Од-

нако мы почему-то не видим ни того, ни другого. Откуда же берется эта необратимость?

В школе объясняют, что все дело в диссипативных (рассеивающих энергию) процессах, переводящих ее в более низкоорганизованную форму. Среди них трение, вязкость, теплопроводность, диффузия, электрическое сопротивление.

Вместе с тем в самых фундаментальных уравнениях, как, например, в уравнении Ньютона (5) или Шредингера

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}=-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi+U\psi \qquad (6)$$

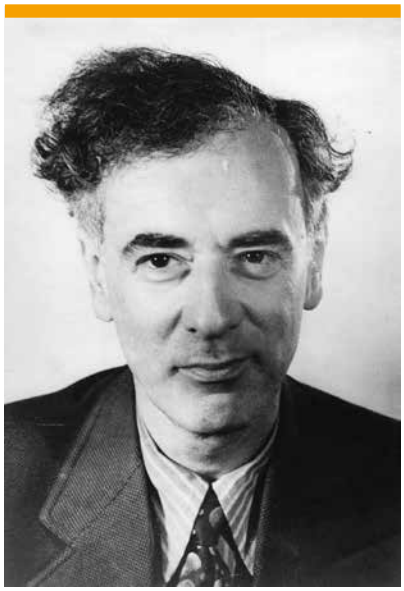
диссипации нет. Она возникает на другом уровне при описании взаимодействия многих частиц.

Уравнения, в которых сохраняется энергия, так называемые *гамильтоновы системы,* были в центре внимания в прикладной математике с 1970-х годов. Это уравнение Кортевега-де-Вриза

$$u_t+uu_x+u_{xxx}=0$$

или кубическое уравнение Шредингера

$$i\phi_t+\Delta\phi+|\phi|^2\phi=0,$$



Л.Д. Ландау

Первая советская атомная бомба благодаря огромной физической интуиции, очень удачным математическим моделям и алгоритмам вычислений была рассчитана на логарифмических линейках.

которые имеют *бесконечно много* законов сохранения. В силу этого их решения во многих отношениях ведут себя как частицы.

Модные сейчас квантовые вычисления также происходят с помощью гамильтоновых, обратимых систем.

Сергей Павлович в этом отношении шел против течения. Именно в необратимости он видел непонятое и непознанное свойство времени. Он считал, что эта необратимость должна содержаться на самом глубоком уровне материи, который описывают фундаментальные теории.

Во время нашей первой встречи я — тогда третьекурсник физфака и Сергей Павлович — ведущий научный сотрудник часа четыре ходили по скверу на Миусской площади. Мы говорили обо всем на свете, вновь и вновь возвращаясь к проблеме времени. Он посоветовал мне множество философских трудов, связанных со временем, которые «хотя и не доходят до уровня моделей, но хотя бы содержат размышления об этих сущностях».

Мысль о важности времени в его необратимой ипостаси возникла у него еще в школе. В течение всей жизни он возвращался к идеям древнегреческого философа Гераклита Эфесского (544–475 гг. до н.э.) и любил повторять его фразу: «Мир не создан никем из богов и никем из людей, а всегда был, есть и будет вечно живым огнем, мерами воспламеняющимся и мерами угасающим». Долгие годы изображение огня было на сайте С.П. Курдюмова *http://spkurdyumov.ru*. Его ведет В.С. Курдюмов, сайт стал одним из крупнейших порталов России.

Здесь две главные доминанты научной судьбы Сергея Павловича. Первая — огонь, необратимые процессы, которые, по его мысли, и являются основой ткани мироздания. Вторая — самоорганизация. Сергей Павлович был атеистом. Но это мировоззрение требует объяснения того, как же возникла вся эта удивительная и прекрасная сложность мира, начиная от элементарных частиц и большого взрыва и кончая человеком, сознанием, обществом.

Мировое признание Сергею Павловичу и его научной школе принесло исследование модели тепловых структур

$$T_t=\mathrm{div}\left(T^{\sigma}\,\mathrm{grad}\,T\right)+T^{\beta},\ \beta>1,\ \sigma>0,$$
$$-\infty<x<\infty,\ T(\vec{r},0)=T_0(\vec{r}). \quad (7)$$

Это уравнение описывает процесс распространения тепла в горящей среде, в которой и коэффициент теплопроводности, и интенсивность источника являются нелинейными функциями температуры. Первоначально это уравнение возникло как часть модели, описывающей быстрые нелинейные процессы в плазме. Однако Сергей Павлович пришел к выводу, что оно заслуживает отдельного, специального изучения, и не ошибся. Решения этого уравнения обладают многими необычными для классической математической физики свойствами.

Во-первых, во многих случаях решения этого уравнения существуют конечное время — растут *в режиме с обострением*

$$\max_{\vec{r}} T(\vec{r},t) \to \infty \quad \text{при } t \to t_f.$$

Во-вторых, в широком классе начальных данных они стремятся при $t \to t_f$ к автомодельным (самоподобным) решениям вида

$$T(\vec{r},t) \to g(t) f(\vec{r}/\phi(t)),$$

где $g(t) = (t_f - t)^{-1/(\beta-1)}$ определяет закон роста амплитуды, $\varphi(t)$ — полуширины, а функция $f(\vec{\xi})$ задает форму профиля температуры.

В-третьих, при $\beta > \sigma + 1$ эти решения оказываются пространственно локализованы. Их можно рассматривать как структуры, возникающие в нелинейной горящей среде. Поскольку диссипативные процессы, которые описывает член $\operatorname{div}(T^{\sigma} \operatorname{grad} T)$, играют в их формировании принципиальную роль, Сергей Павлович назвал их *нестационарными диссипативными структурами.*

В-четвертых, был обнаружен большой класс таких структур, представляющих собой сходящиеся к центру волны горения, в котором может быть множество максимумов, минимумов, слоев. В достаточно простом уравнении открылся целый мир.

В-пятых, в простейшем «линеаризованном» случае уравнение для функции f совпало с уравнением Шредингера для атома водорода (точнее, для его «пространственной части»). Естественно возник вопрос, нельзя ли интерпретировать атом как структуру горящей среды.

В одном нелинейном уравнении открылось огромное пространство возможностей. О замечательных математических методах и результатах, полученных при его исследовании, тоже можно рассказывать подробно и интересно.

В институте любили Сергея Павловича за его энергию, оптимизм, доброжелательность, умение организовать коллектив единомышленников, за справедливость и принципиальность. В течение многих лет он был секретарем парткома института, а затем был избран его директором. Нашим первым директором был М.В. Келдыш, вторым — А.Н. Тихонов, третьим — Сергей Павлович.

Вместе с тем работу по глубокому исследованию модели тепловых структур и режимов с обострением в институте не всегда ценили и поддерживали. Академик А.Н. Тихонов советовал Сергею Павловичу взяться за более сложные и реалистичные модели, академик А.А. Самарский настаивал на том, что следует заниматься вычислительной математикой. Выдающийся физик, один из создателей советского ядерного оружия, академик Я.Б. Зельдович говорил, что природа любит гамильтоновы системы. Сергей Павлович, относящийся с глубоким уважением к этим людям, шел своим путем. Иногда отвечал: «Сегодня мы подтаскиваем математический аппарат для будущих физических теорий. И скоро все это понадобится».

Иногда говорят, что исследователи являются сотрудниками единого «незримого колледжа», и единомышленниками могут оказаться ученые, работающие на другом конце планеты. Для Сергея Павловича большой поддержкой оказались работы выдающегося бельгийского ученого лауреата Нобелевской премии по химии (1977) Ильи Романовича Пригожина. Их объединяло не только исследование диссипативных структур, но и создание нового научного мировоззрения.

По сути, есть три картины физической реальности. В первой, восходящей к Ньютону, мир предстает огромным часовым механизмом, созданным и запущенным Богом. И цель ученых состоит в том, чтобы постичь замысел этого творения. Этой идее следовал Эйнштейн, превратив

Группа участников конференции по синергетике в 2004 г. Верхний ряд: С.П. Курдюмов, В.И. Аршинов, В.Г. Буданов, Г. Хакен, Г.Г. Малинецкий, К. Майнцер, И.Е. Москалев, В.С. Курдюмов. Нижний ряд: В.В. Мурина, Н.М. Чернавская, В.Л. Романов, В. Эбелинг

время просто в одну из координат в своем описании пространства-времени. Этот идеал, к которому стремится большинство современных физиков, известный специалист по космологии Стивен Хокинг выразил в следующих словах: «Если мы действительно откроем полную теорию, то со временем ее основные принципы станут доступны пониманию каждого, а не только нескольким специалистам. И тогда все мы, философы, ученые и просто обычные люди, сможем принять участие в дискуссии о том, почему так произошло, что существуем мы и существует Вселенная. И если будет найден ответ на такой вопрос, это будет триумфом человеческого разума, ибо тогда нам станет понятен замысел Бога».

Другая выдающаяся физическая теория — квантовая механика — имеет двойственную природу. На уровне описания объектов микромира мы вновь имеем дело с гамильтоновыми системами и эрмитовыми операторами. Но это описание определяет не само состояние квантового объекта, а вероятность найти его в том или ином положении в результате измерения. Необратимость создает процедура измерения, в результате которого из множества возможностей выбирается одна. Модель же «измерителя» и его свойства при этом обычно выносятся за скобки. Вместе с тем само поле возможностей четко очерчено. Нового не возникает. Времени вновь нет.

И конечно, эта ситуация, имеющая мало общего с тем, что мы видим в мире, вызывает неудовлетворенность. Выдающийся математик и физик-теоретик Роджер Пенроуз выразил ее в таких словах: «Я убежден, что наше современное представление о физической реальности — особенно в том, что касается природы *времени,* — нуждается в коренном пересмотре, пожалуй, даже в более радикальном, чем тот, который был вызван к жизни современной теорией относительности и квантовой механикой» [8].

Путь к новому пониманию времени сам Роджер Пенроуз связывал с пока не созданной квантовой теорией гравитации. Илья Пригожин в конечном итоге приходил к несамосопряженным квантовомеханическим операторам, описывающим системы, в которых будущее отличается от прошлого.

Сергей Павлович полагал, что ответ даст теория самоорганизации и нелинейная динамика. В самом деле, развитие и в теории эволюции, и в биологии, и в истории все чаще трактуется как прохождение последовательности бифуркаций. При этом выбор, зачастую случайный, сделанный на одном уровне организации материи, может определить законы, действующие на другом. Мир не является ньютоновским часовым механизмом, он здание, которое недостроено, система в процессе своего творения, и мы иногда можем выступать не в качестве пассивных наблюдателей, а в роли его творцов. Акт творения возникает в результате разрешения тех или иных противоречий. И это очень близко к гераклитовскому мировидению.

Предчувствие будущей революции физики, как это обычно бывает, возникает и у писателей, поэтов, философов: «Отрицание временной последовательности, отрицание себя, отрицание астрономической Вселенной — все это акты отчаяния и тайного сожаления. Время — это река, уносящая меня, но я сам река; это тигр, пожирающий меня, но я сам тигр; это огонь, поглощающий меня, но я сам огонь». Эти строки выдающегося писателя Хорхе Луиса Борхеса были очень близки Сергею Павловичу. Он сам зажигал огонь, освещающий путь в будущее.

С.П. Курдюмов

Синергетика в гуманитарном измерении

Тот, кто не хочет прибегать к новым средствам, должен ожидать новых бед.

Ф. Бекон

В 1950-х годах английский писатель и физик Чарльз Сноу с тревогой писал о растущей пропасти между двумя культурами — естественнонаучной и гуманитарной. Первая опирается на эксперимент и формализованные теории. Она устремлена в будущее, отвечает на вопрос «как?» и игнорирует авторитеты, стремясь к объективности. Вторая в большой степени обращена в прошлое, опирается на традицию, принимает во внимание мнение известных лиц. Она должна отвечать на вопросы о целях, стратегиях, должном, допустимом и желательном — на вопрос «что?».

Очевидно, средства, созданные благодаря стремительно растущим возможностям естественных наук, употребляемые в неверных целях, могут представлять огромную опасность. С другой стороны, провал гуманитарных дисциплин, не умею-

Нельзя в сегодняшнем или тем более в завтрашнем дне исходить из картины мира, относящейся ко вчерашним реалиям. Мир меняется очень быстро и существенно.

щих или не желающих заглядывать в будущее, не менее фатален. Нельзя в сегодняшнем или тем более в завтрашнем дне исходить из картины мира, относящейся ко вчерашним реалиям. Мир меняется очень быстро и существенно.

Сергей Павлович считал, что именно синергетика и междисциплинарные подходы дадут тот общий язык, на котором естественники, гуманитарии, математики, эксперты, руководители смогут обсуждать свои проблемы, полученные результаты, ставить задачи и рассматривать наиболее вероятные последствия принимаемых решений. Он думал, что именно синергетика станет мостом, переброшенным над пропастью между двумя культурами.

Немецкий физик-теоретик Герман Хакен, предложивший термин «синергетика», вкладывал в него тот же смысл.

С одной стороны, этот подход рассматривает появление новых свойств и качеств у сложных систем, части или элементы которых такими свойствами не обладают.

С другой стороны, это подход, развитие которого требует совместных творческих усилий и взаимодействия естественников, математиков, гуманитариев, инженеров, управленцев.

Почти полвека развития синергетики показали, что достигнутые успехи пока представляются достаточно скромными. Активность и желание взаимодействовать со стороны естественников и математиков многократно превышают готовность и желание гуманитариев сотрудничать.

В схожей ситуации развития совместной деятельности математиков и биологов, где также поначалу не все шло гладко, сотрудник ИПМ, выдающийся математик и основоположник математической медицины, академик И.М. Гельфанд говорил: «Главная проблема в том, что математики не знают математику, а биологи — биологию».

Возможно, сдвиги в сознании научного сообщества происходят достаточно медленно, и пока просто прошло слишком мало времени. Как говорил Сергей Павлович: «Будьте готовы к тому, что работу, которую вы написали сегодня, прочтут, поймут и оценят лет через десять, а то и позже».

Но, наверно, главная причина в том, что и гуманитарии, и математики, и естественники остро ощущают преимущество своего стиля мышления и восприятия мира, а потому не готовы всерьез учиться иному, вставать на другую точку зрения, вести на равных содержательный диалог. Это общее правило. Но Сергей Павлович относился к счастливым исключениям.

На первых курсах, во время учебы на физическом факультете МГУ, у него был план перейти на философский факультет, чтобы разобраться с самыми общими вопросами познания и бытия. Большой удачей стало то, что в деканате этого факультета ему попался мудрый человек. Он посоветовал сначала стать физиком, а потом браться за все остальное. И если интерес к философии не пропадет, то этими проблемами можно будет заняться позже.

Интерес не пропал. Просматривая список научных трудов Сергея Павловича, в котором более 500 названий, видишь, что существенная часть работ посвящена гуманитарной проблематике. Более 10 учеников Сергея Павловича стали докторами физико-математических наук, а Елена Князева — философских. Тиражи его книг, посвященных философским проблемам, намного превышают тиражи его работ по прикладной математике.

С.П. Курдюмов считал, что в ходе работы на острие научных проблем XX века в институте возникли новое знание, понимание и мировоззрение, значение которых далеко выходит за пределы уже решенных задач, и очень важно было бы сделать все это достоянием всего общества.

В философии он видел способ сделать понятое элементом культуры. «Надо вовлечь друзей, коллег, гуманитариев в тот замечательный театр идей, который мы увидели». И сам Сергей Павлович занимался этим с огромной энергией и энтузиазмом. Он читал лекции школьникам и академикам, профессорам и студентам. За последнее десятилетие своего творческого пути он прочел более сотни лекций на конференциях, организованных ассоциацией «Женщины в науке и образовании», возглавляемой Галиной Юрьевной Ризниченко. Он был очень увлекающимся лектором и готов был превысить временной лимит, отведенный ему на выступление, многократно — были бы слушатели.

Кроме преподавания на Физтехе Сергей Павлович вел несколько курсов в Дубне, в университете «Природа, общество,

человек», созданном Евгенией Наумовной Черемисиной — человеком огромной энергии, способностей и доброжелательности. Там его с восхищением слушали сотни человек. «Мне нравятся большие аудитории. Всегда думаешь, что из многих несколько человек воспримут наши идеи и либо воплотят в жизнь, либо понесут дальше, в будущее».

Он привлек к преподаванию в Российской академии государственной службы при Президенте РФ (РАГС) многих своих учеников: «Если мы объясним будущему президенту России, каким будет мир завтрашнего дня и каким образом в государственных делах следует опираться на науку, то этого будет более чем достаточно», — с энтузиазмом говорил он коллегам. В РАГСе «мотором», стремившимся включить в преподавание высшим государственным чиновникам идеи синергетики и междисциплинарности, был Вячеслав Леонидович Романов — доктор и социологических, и медицинских наук. Жаль, что РАГС поглотила Академия народного хозяйства и переориентировала его вместо второго высшего образования, направленного на подготовку государственных руководителей высокого ранга, на первое высшее, связанное с обучением мелких клерков.

Думается, Сергей Павлович объехал всю страну. Во многих городах у него появились друзья и единомышленники, увлеченные идеями синергетики. Многие слушали его всего несколько раз, но пошли по намеченному им пути. «Дальние дети — самые близкие», — порой говорил он. Десятые Курдюмовские чтения в Твери — яркое тому подтверждение.

Гуманитарная и просветительская часть деятельности Сергея Павловича часто вызывала и непонимание, и своеобразную ревность его «физико-математических учеников». Помню, как долго и горячо мы с ним обсуждали его книгу «Основания синергетики», в которой было дано философское обоснование этого междисциплинарного подхода. В математических книжках вводимые сущности требуют более жестких и точных формулировок, а область применимости полученных результатов и их обобщений должна быть четко очерчена. Сейчас мне ясно, что нельзя требовать от полотен импрессионистов той ясности и прорисовки деталей, к которой стремился классицизм. Но тогда споры были очень горячими.

Докладчик — С.П. Курдюмов

Масштаб замыслов Сергея Павловича стал ясен, когда в 1990-х годах по инициативе ректора Российского открытого университета (РОУ) Б.М. Бим-Бада в нем был организован факультет прикладной математики, научным руководителем которого стал Сергей Павлович. Б.М. Бим-Бад видел в науке школу рационального мышления и считал, что рефлексия ученых над своим творчеством и яркая научная работа очень много могут дать студентам. Были начаты новые проекты, связанные с математической психологией, со стратегической стабильностью, синергетикой, исследованием и использованием динамического хаоса, с имитационным моделированием мировой динамики и нетрадиционными подходами к описанию экономических процессов. К этой работе были привлечены многие выдающиеся ученые. Если бы этот проект просуществовал хотя бы с десяток лет, то, вероятно, прикладная математика в современной России была бы совсем другой...

Сергей Павлович был желанным гостем в Институте философии РАН (ИФ РАН). Во многом это связано с духовной близостью и научным сотрудничеством с выдающимся специалистом по философии науки, тогда директором ИФ РАН Вячеславом Семеновичем Степиным, со взаимодействием с сотрудниками этого института В.И. Аршиновым, В.Г. Будановым, Е.Н. Князевой, Я.И. Свирским. Все они провели много часов дома у Сергея Павловича в беседах о главных проблемах синергетики и современной философии.

Сейчас, перечитывая «философские книги» Сергея Павловича, ловишь себя на мысли, что очень много важного и интересного, того, что рождалось в спорах, беседах, выступлениях, оказалось упущено.

Многие гуманитарные проблемы Сергей Павлович обсуждал со своими друзьями — С.П. Капицей и ректором МФТИ Николаем Васильевичем Карловым, оставившим блестящие воспоминания о Физтехе «Основные этапы сосания лапы», как он сам их назвал, и глубокие размышления о сущности образования.

Сергей Павлович не очень любил писать, предпочитал обсуждать, докладывать, делиться результатами с учениками и коллегами. Как я понимаю, именно этот «сократический стиль», превращающий коллег и знакомых в друзей и единомышленников, сыграл очень важную роль в становлении синергетики в нашем отечестве. Сергей Павлович часто повторял: «Наука — это диалог. Это то, что связывает, а не разделяет». Однако оставшиеся «гуманитарные книги» — скорее его монолог. Думается, что ему очень не хватало «гуманитарного собеседника» его масштаба, так же страстно увлеченного проблемами междисциплинарности и строительством моста над пропастью между двумя культурами.

Вместе с тем многое из того, о чем он мечтал, воплотилось в реальность. Леонардо-да-Винчи называл оптику «раем для математиков». С не меньшим основанием гуманитарные науки можно назвать «раем для синергетиков». Дело в том, что репертуар механизмов самоорганизации на разных уровнях и в разных масштабах — психики, пространства знаний человека и общества, малых групп, государств, этносов, различных сообществ, компаний — огромен. Он гораздо больше, чем, к примеру, в физике или химии.

Сергей Павлович в течение нескольких десятилетий занимался физикой плазмы и, в частности, проблемами управляемого термоядерного синтеза (УТС), который должен был бы дать океан дешевой, чистой энергии. Но плазма удивительно изобретательна. Как только ученые укрощали одну неустойчивость, мешающую удержать плазму в реакторе, ее сменяла следующая, не менее коварная. И это происходит уже почти полвека. При этом каждая неустойчивость — результат самоорганизации, которая здесь выступает в такой зловредной роли.

Однако нечто подобное происходит и с обществом, где нужны большие усилия для того, чтобы самоорганизация действовала не во зло, а во благо.

При поддержке Сергея Павловича была начата [6], а сейчас продолжена работа по моделированию российской системы образования. Показано, что управляющие воздействия в последние 20 лет привели сначала к ее деградации, а потом к развалу, к превращению в «колониальное образование». Построены модели, проанализированы данные, работы получили высокую оценку научного сообщества. Но получилось все именно так, как предсказывал М.В. Келдыш. Текст писан, но не читан, текст читан, но не понят, текст понят, но не так, а Васька слушает да ест.

В бытность Сергея Павловича была выдвинута исследовательская программа, связанная с построением *математической истории* [6]. В основе этого подхода лежат следующие положения:

- полномасштабное междисциплинарное моделирование исторических процессов с использованием результатов экономики, социологии, социальной психологии, истории техники и военного дела;
- анализ точек бифуркации на территориях исторического развития и открывавшихся альтернатив (при таком подходе у истории появляется *сослагательное наклонение*);
- решение задачи *исторического прогноза* и его использование в задачах стратегического прогноза (при этом у исторической науки появляется и *повелительное наклонение*).

Эта программа была подхвачена и в России, и в США. Ее развитие позволило получить ряд важных и интересных результатов [9–12]. Но мало иметь науку в государстве. Ею надо еще и пользоваться.

Сергей Павлович считал, что наука должна помогать обще-

70-летие С.П. Курдюмова. Академики РАН А.А. Самарский, О.М. Крохин, Н.Г. Басов, профессор С.П. Капица, член-корреспондент РАН С.П. Курдюмов и др.

ству и государству, служить ему опорой. Синергетика может очень многое во многих областях. Но одно из наиболее важных ее дел сегодня — это *проектирование будущего,* анализ тех небольших изменений сегодня, которые могут в 10–20-летней перспективе изменить будущее крупных компаний, регионов, стран, мира в целом. Составной частью этой работы является системный анализ, математическое моделирование, выработка стратегий и синтез управляющих воздействий, которые могли бы обеспечить достижения поставленных целей. И здесь также есть важные научные результаты и практические рекомендации [13–16]. Приятно иногда увидеть фрагменты этих работ или отдельные мысли в выступлениях первых лиц государства. Однако хотелось бы гораздо большего.

Одной из любимых мыслей Сергея Павловича была идея о нелинейной среде, свойства которой определяют поле возможностей — типы структур, которые на этой среде могут быть построены. Естественно, это относится к социальным средам. Чтобы в них появились эффективно работающие структуры, в том числе использующие науку или управляющие ею, надо менять свойства среды.

Например, Сергей Павлович мечтал об «обучающей игровой программе», дающей представление о междисциплинарном мировидении и знакомящей с идеями теории самоорганизации.

Эти идеи нашли воплощение в нескольких проектах. С 2002 г. в издательстве URSS выпускается серия книг «Синергетика от прошлого к будущему». Здесь и учебники, и популярные книги, и монографии, посвященные нелинейной науке. К настоящему времени в серии выпущено более 70 книг, некоторые из них переведены на испанский язык. Тиражи нескольких из них с учетом множества переизданий вышли на рекордные для России и этого сегмента книжного рынка показатели. Обзор первых шестидесяти представлен в книге «Пространство синергетики» [17].

На нашем телевидении в течение многих лет культивируется клиповое сознание.

С 2004 г. в этом же издательстве выпускается серия «Будущая Россия». К настоящему времени в ней издано около 30 книг. В некоторых из них предложены конструктивные способы решения российских проблем и прочерчены контуры будущего. Междисциплинарность оказалась и здесь очень важна. В XXI веке одной организации недостаточно, придется опираться на самоорганизацию и знание ее законов.

Представление о науке как диалоге, борьбе идей, подходов, проектов должно жить в массовом сознании. Даже в лучших российских научно-популярных передачах этого не было. В прекрасной передаче С.П. Капицы «Очевидное — невероятное» блестящий ведущий расспрашивал выдающегося ученого, который, как казалось, знает ответы на все вопросы в своей области. В передаче Гордона, которая шла после полуночи, ученые вели интересные диалоги, зачастую забывая о зрителе, который тоже хотел бы что-нибудь вынести из увиденного.

Однако четыре года назад мечта Сергея Павловича оказалась удивительным образом воплощена. На канале ТВЦ в ночь с понедельника на вторник каждую неделю шла программа Анны Урманцевой «Мозговой штурм» (mozgovoyshturm.ru).

В этой программе ведущие ученые, как правило, имеющие противоположные мнения, обсуждали важные для общества научные проблемы.

Поскольку «нет пророка в своем отечестве», во многих передачах в эфир выходил американский корреспондент, рассказывающий, как решаются подобные проблемы в США. Выяснялось, что иногда обсуждаемые задачи у них решаются лучше, чем у нас, а иногда гораздо хуже. Кроме того, в коротких репортажах показывали, как идет работа в этой области в различных российских лабораториях.

Вы заметили, что у нас перестали показывать лица крупным планом? Крупно показанное лицо молчащего человека говорит о нем почти все. А если сказать нечего, то... лучше и не показывать. На лица участников «Мозгового штурма» смотреть очень интересно.

На нашем телевидении кроме курсов доллара и евро и цены барреля нефти практически исчезли количественные показатели. Эмоциональное восприятие вытеснило рацио. В течение многих лет культивируется клиповое сознание.

«Мозговой штурм» решил обращаться со своими зрителями как со взрослыми людьми, представляя в каждой передаче результаты математического моделирования обсуждаемых процессов либо статистическую справку. И то и другое позволяет зрителям самим составить мнение о вопросах, обсуждаемых учеными в эфире. Эти материалы готовились в научно-образовательном центре ИПМ. При этом в передаче фигурировала только вершина айсберга переработанной и проанализированной информации. По некоторым, наиболее интересным и важным, передачам, была выпущена книга, в ко-

торой обсуждение было представлено «без купюр» и подготовленная в ИПМе информация была дана в полном объеме [18]. Думаю, Сергею Павловичу такой подход к изменению информационного и социального пространства в нашем отечестве понравился бы.

Делай, что должно, и будь, что будет, а будущее покажет, достаточно ли было сделанного.

Самоорганизация. От знания к пониманию

Мы ничего не хотим знать, но все хотим понимать.

А. Эйнштейн

«Научный внук» Сергея Павловича Андрей Подлазов, секретарь семинара «Будущее прикладной математики», который проводится в ИПМ уже не один десяток лет, любит при обсуждении докладов говорить: «Если понимание достигнуто, то его результаты можно изложить в любом заданном объеме — от абзаца до книжного шкафа».

Теория самоорганизации сегодня находится на том уровне, когда о ней можно рассказать кратко и содержательно.

Американский философ и историк науки Томас Кун в 1950-х годах ввел очень яркий и удачный термин «парадигма». Этим словом он назвал выдающееся научное достижение, которое определяет уровень и задает стандарт научной работы в некоторой области исследований, подходе или науке, а также позволяет генерировать задачи разного масштаба и сложности, развивающие и обобщающие полученный результат.

Психологический возраст человека естественно измерять не календарными годами, а тем, что пережито, понято, сделано. Вероятно, точно так же «возраст» какой-либо науки или подхода можно оценить по числу парадигм, которые сменяли в них одна другую. Характерным признаком смены парадигмы является ситуация, в которой казавшееся сложным оказывается простым и, напротив, в простом открываются глубина и не осознававшиеся ранее проблемы. В синергетике уже было три парадигмы и сейчас на наших глазах рождается четвертая. В чем же их суть?

Парадигма диссипативных структур во многом связана с объяснением того, почему в открытых, нелинейных, далеких от равновесия системах возникают различные типы упорядоченности. Например, сходящиеся к центру волны горения, которые описываются уравнением [7], или стационарные (не зависящие от времени) распределения концентраций в химической реакции [19], или спиральные волны в возбудимой среде, ответственные за возникновение сердечных аритмий. Впервые на важность, парадоксальность и саму возможность возникновения таких структур обратил внимание выдающийся английский математик, криптограф, один из пророков компьютерной эры Алан Тьюринг.

Он предложил описывать сложнейший биологический процесс клеточной дифференцировки в растениях с помощью системы уравнений, учитывающей только процессы диффузии двух реагентов и химическую реакцию, протекающую между ними:

$$\begin{gathered} X_t = D_1 X_{rr} + f(X,Y); \\ Y_t = D_2 Y_{rr} + g(X,Y); \\ 0 \le r \le l,\ X_r(0,t) = X_r(l\ t) = \\ = Y_r(0,t) = Y_r(l,t) = 0; \\ X(r,t) = X_0(r),\ Y(r,t) = Y_0(r). \end{gathered} \quad (8)$$

Описание процессов в нелинейной среде — сложнейшая задача. Она требует определения по крайней мере одного числа, характеризующего состояние среды, в каждый момент времени в каждой точке пространства. В результате самоорганизации возникает упорядоченность в обычном физическом пространстве. Ее описание требует всего лишь нескольких чисел (параметров порядка). За внешней сложностью скрывается внутренняя простота.

В научной школе С.П. Курдюмова это было показано для многих замечательных уравнений и задач и, в частности, для обобщенного, зависящего от времени уравнения Гинзбурга — Ландау (или, как его часто называют в литературе, уравнение Курамото — Цузуки)

$$W_t = W + (1+ic_1)\Delta W - (1+ic_2)|W|^2 W.$$

Здесь тоже удалось увидеть и новые виды упорядоченности и выделить параметры порядка [20].

Сейчас в рамках этой парадигмы в центре внимания оказались процессы упорядочения, происходящие на наномасштабах. В частности, в качестве символа нанотехнологий часто используют удивительно красивую молекулу фуллерена C_{60}, имеющую форму футбольного мяча размером 1 нанометр (нм) и необычные физические, химические и биологические свойства. Однако сама эта молекула не строится учеными атом за атомом, а возникает в результате самоорганизации при определенных условиях.

Другой пример. Из школьного курса химии мы знаем, что благородный металл — золото — является химически инертным и не обладает каталитической активностью. Однако в конце 1980-х годов японский исследователь Масатаке Харуто показал, что каталитическая активность золота при размере его наночастицы в 3 нм превосходит даже активность платины, одна-

Академик РАН В.С. Степин, С.П. Курдюмов и В.В. Курдюмова

ко при уменьшении размера до 2,5 нм она падает в пять раз [21]. Можно сказать, что в таких системах каждый атом оказывается на счету.

Будущность нанотехнологий сейчас зависит от того, удастся ли выяснить законы самоорганизации на наноуровне, научиться для многих веществ проходить путь «снизу вверх» — от наномасштабов до макрообъектов — и использовать полученное знание.

Парадигма динамического хаоса. Выдающийся ученый наполеоновской эпохи П.С. Лаплас считал, что ум, достаточно мощный для того, чтобы принять в расчет координаты и скорости всех частиц во Вселенной, может заглянуть как угодно далеко в прошлое и как угодно далеко в будущее. Или, говоря современным языком, при наличии достаточных вычислительных мощностей может быть сделан глобальный прогноз. Такого мнения ученые придерживались до 1963 г.

В 1963 г. американский метеоролог Эдвард Лоренц исследовал простейшую математическую модель формирования погоды, состоящую из трех обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{f}(\vec{x}),\ 0 \le t \le \infty, \qquad (9)$$
$$\vec{x}(0) = \vec{x}_0,\ \vec{x} = (x_1, ..., x_p).$$

Компьютерный расчет показал, что исследованные уравнения порождают непериодические траектории, хаотические колебания [22]. Более того, само состояние этой системы мы можем предсказать только до определенного времени, называемого *горизонтом прогноза*, а дальше приходится опираться на вероятность и статистику.

Открытие этого явления, называемого *динамическим хаосом*, показало, что в очень простых системах вида (9) (даже когда $p = 3$) может иметь место очень сложное и интересное поведение!

Это открытие самым существенным образом повлияло на мировоззрение. Одной из основных задач науки является прогноз. И когда в этой области устанавливаются фундаментальные ограничения, то мир начинает восприниматься по-другому.

Для систем с динамическим хаосом имеет место *эффект бабочки* — взмах ее крыльев в правильном месте в правильное время может вызвать через 2–3 недели разрушительный ураган за 1000 километров от того цветка, на котором сидела бабочка. Малые причины в таких системах могут иметь большие последствия. И такие системы являются правилом, а не исключением для нашего мира.

И здесь также принципиальную роль играют самоорганизация и диссипативные процессы. Со времени Ньютона числа $x_1, ..., x_p$ в уравнении (9) рассматривают как координаты точки в *фазовом пространстве* исследуемой системы. Каждая точка в этом пространстве соответствует одному из возможных состояний изучаемого объекта. Если в системе (9) есть члены, описывающие диссипативные процессы (например, теплопроводность или вязкость, как в системе Лоренца), то с течением времени траектория $\vec{x}(t)$ стремится к притягивающему множеству в фазовом пространстве, называемому аттрактором (от английского *to attract* — притягивать). Это также самоорганизация — из огромного пространства возможностей системы (9) «выбирают» лишь небольшую их часть.

Применения динамического хаоса обширны и разнообразны — медицинская диагностика, защита информации, новые типы радиосвязи, а также многое-многое другое.

Парадигма сложности. Первые две парадигмы имели дело с отдельными объектами, третья — с системами. От мудрецов Античности до нас дошел классический парадокс. Миллион песчинок — куча. Будем постепенно забирать по песчинке из нее. В конце концов остается одна песчинка, которая точно не куча. Где же та грань, за которой множество песчинок становится кучей?

В рамках парадигмы сложности и, в частности, в теории самоорганизованной критичности ученые научились отвечать на подобные вопросы [23, 24]. Системные свойства множества населенных пунктов в географии были открыты еще в начале XX века Дж. Ципфом. Оказалось, что если расположить города в порядке убывания числа жителей $N_r, r = 1, 2...$ (N_1 — население самого большого города, N_2 — второго по величине и т.д.), то для больших стран мира в целом и других целостных систем

$$N_r \approx r^{-1}. \qquad (10)$$

Подобный закон характерен и для множества других си-

Рисунок 1

Зависимость «ранг — размер» для максимальной распространенности компьютерных вирусов

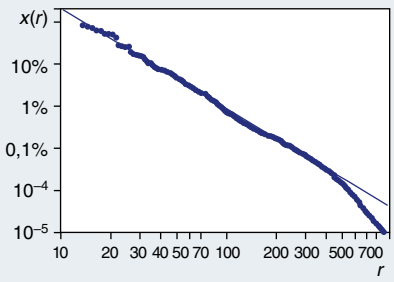


Рисунок 2

Зависимость «ранг — размер» для капитализации крупнейших компаний, млрд долл.

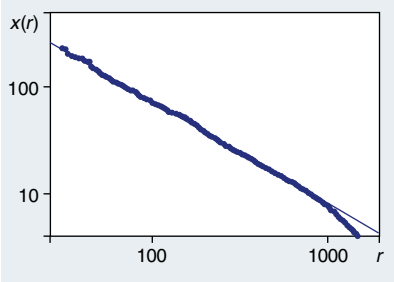


Рисунок 3

Зависимость «ранг — размер» для числа жителей населенных пунктов России

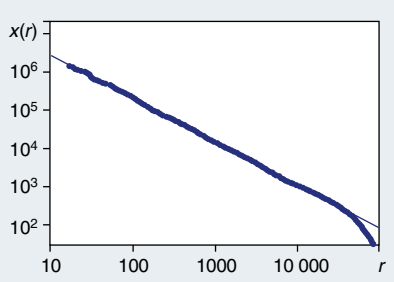
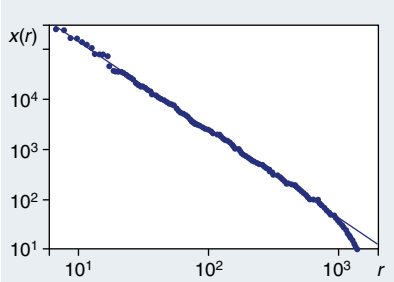


Рисунок 4

Зависимость «ранг — размер» для числа раненых в ходе стихийных бедствий



стем (*рис. 1–4*). Законы вида [10] иногда называют зависимостями «ранг — размер». Их удобнее представить в логарифмических координатах, откладывая по осям не сами величины, а их логарифмы.

Оказывается, что зависимости, подобные (1), с показателями, близкими к 1, характерны и для статистики стихийных бедствий и техногенных катастроф (см. *рис. 1–4*). И это тоже существенно меняет мировоззрение.

В самом деле, наша интуиция настроена на «гауссовы» законы, в соответствии с которыми большие отклонения от средних значений почти невероятны. Характеристики людей распределены по такому же закону, и мы с легкостью можем пренебречь вероятностью встречи с 2,5-метровым гигантом и 30-сантиметровым карликом. На «гуманитарном языке» этот факт выражает расхожая мудрость: «Чудес не бывает».

Но выражение (10) свидетельствует о прямо противоположном. Гигантские отклонения возможны, и мы с ними иногда сталкиваемся. Например, ущерб и затраты на ликвидацию последствий Чернобыльской аварии пока превышают *общие* расходы такого типа *для всех* аварий в мировой атомной энергетике [25].

Позитивный пример. Гонорары авторов как художественных, так и научных книг на удивление невелики. Вместе с тем доход создательницы «Гарри Поттера» Джоан Роулинг превысил 1 млрд долл. США. Берясь за перо, автор оказывается в пространстве, где возможны события гигантского масштаба. «Эти сегодня стихи и оды, в аплодисментах ревомые ревмя, войдут в историю как накладные расходы на сделанное нами — двумя или тремя», как писал поэт.

Это гораздо ближе к восточным сказкам «1001-й ночи», в которых джинны, дэвы, ифриты высотой в десятки или сотни метров встречаются нечасто, но уж если они попались на пути, то последствия этого оказываются огромны.

Замечательно, что одной из главных моделей теории самоорганизованной критичности является куча песка и что в этом случае самоорганизация также играет ключевую роль [23, 24].

В самом деле, представим себе чашку весов, на которую случайным образом падают песчинки. Когда возникла горка песка, падающая песчинка может остаться в ней, привести к падению с чашки другой песчинки или к сходу целой лавины.

Если горка достаточно крутая, то больших лавин будет сходить много и крутизна кучи будет уменьшаться. Если, напротив, куча пологая, то крутизна ее будет расти. И эта своеобразная самоорганизация будет вести систему в положение неустойчивого равновесия, в котором возможны лавины любого масштаба.

Этот механизм является очень общим и типичным. Детали моделей здесь, как правило, несущественны.

Сейчас модели, создаваемые в рамках парадигмы сложности, успешно применяются для описания землетрясений и биржевых крахов, техногенных катастроф и работы сознания, биологической эволюции и солнечных вспышек. Горизонты теории самоорганизации стремительно расширяются.

В нашем институте работало много выдающихся ученых. И иногда в связи с различными юбилеями открывают посвященные им мемориальные доски.

— А Сергею Павловичу Курдюмову тоже со временем на здании Института установят доску? — спросил меня как-то дипломник.

— Это зависит от нас с вами, от того, насколько успешно мы будем развивать его подходы и теорию самоорганизации. Будущее часто дает оценку прошлому.

Пока все идет неплохо. И это прекрасно!

ПЭС 15039/03.04.2015

Примечание

1. Создатель современной алгебры Виет был криптографом короля Генриха IV во Франции.

Источники

1. Мне нужно быть: Памяти Сергея Павловича Курдюмова / Ред.-сост. З.Е. Журавлева. М.: КРАСАНД, 2010. 480 с.
2. Режимы с обострением. Эволюция идеи. Законы коэволюции сложных структур. М.: Наука, 1998. 255 с.
3. Успенский В.А. Математическое и гуманитарное: преодоление барьера. 3-е изд. М.: МЦНМО, 2014. 48 с.
4. Всемирная философия / Ред. А.Р. Грицанов. М.: АСТ, Минск: Харвест, Современный литератор, 2001. 1312 с.
5. Математика: границы и перспективы. М.: ФАЗИС, 2005. 624 с.
6. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. 3-е изд. М.: Издательство УРСС, 2003. 288 с. (Синергетика: от прошлого к будущему).
7. Пригожин И., Стенгерс И. Время. Хаос. Квант. К решению парадокса времени. 6-е изд. М.: КомКнига, 2005. 232 с. (Синергетика: от прошлого к будущему).
8. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. 4-е изд. М.: Издательство УРСС; Издательство ЛКИ, 2011 400 с. (Синергетика: от прошлого к будущему).
9. Проблемы математической истории: Основания, информационные ресурсы, анализ данных / Отв. ред. Г.Г. Малинецкий, А.В. Коротаев. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 256 с.
10. Проблемы математической истории: Математическое моделирование исторических процессов / Отв. ред. Г.Г. Малинецкий, А.В. Коротаев. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. 208 с.
11. Турчин П.В. Историческая динамика: по пути к теоретической истории. 2-е изд. М.: Издательство ЛКИ, 2010. 368 с. (Синергетика: от прошлого к будущему).
12. Бадалян Л.Г., Криворотов В.Ф. История. Кризисы. Перспективы: Новый взгляд на прошлое и будущее. 2-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 288 с. (Синергетика: от прошлого к будущему. № 50. Будущая Россия).
13. Будущее России в зеркале синергетики / Под ред. Г.Г. Малинецкого. М.: КомКнига, 2006. 272 с. (Синергетика: от прошлого к будущему).
14. Синергетика. Будущее мира и России / Под ред. Г.Г. Малинецкого. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 384 с. (Синергетика: от прошлого к будущему. Будущая Россия).
15. Будущее России. Вызовы и проекты: Экономика. Техника. Инновации. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 344 с. (Будущая Россия).
16. Малинецкий Г.Г. Чтоб сказку сделать былью… Высокие технологии — путь России в будущее. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. 224 с. (Синергетика: от прошлого к будущему. № 58; Будущая Россия. № 17).
17. Малинецкий Г.Г. Пространство синергетики. Взгляд с высоты. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 248 с. (Синергетика: от прошлого к будущему. № 60).
18. Урманцева А. Мозговой штурм. Избранные дискуссии. М.: ЗАО «СВР-Медиапроекты», 2013. 336 с.
19. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. 512 с.
20. Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А. Структуры и хаос в нелинейных средах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 483 с.
21. Эрлих Г. Золото, пуля, спасительный яд. 250 лет нанотехнологий. М.: КоЛибри, Азбука-Аттикус, 2012. 400 с. (Galileo).
22. Странные аттракторы / Под. ред. Я.Г. Синая, Л.П. Шильникова. М.: Мир, 1981. 256 с.
23. Бак П. Как работает природа. Теория самоорганизованной критичности. М.: УРСС; Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. 276 с.
24. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Подлазов А.В. Нелинейная динамика: Подходы. Результаты. Надежды. М.: КомКнига, 2006. 280 с. (Синергетика: от прошлого к будущему).
25. Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Малинецкий Г.Г. и др. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. М.: Наука, 2000. 431 с. (Кибернетика: неограниченные возможности и возможные ограничения).

Физик и философ В.Г. Буданов беседует с В.В. Курдюмовой и Г.Ю. Ризниченко