

1-й Московской международной конференции по исследованию операций

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

П.С.Краснощеков

Исследование операций – наука молодая, но уже зрелая. По своему предназначению и по истории возникновения эта наука исключительно прикладная, т.е. полезная для человека во всех отношениях. Как наука о принятии решений она своими истоками уходит в глубокую древность. С начала своего возникновения человечество любое важное решение предваряло различного рода ритуалами: танцами, жертвоприношениями, гаданием по звездам, заговорами и т.п. Астрология, наверное, была первой серьезной попыткой обоснования принимаемых решений с помощью определенных формальных процедур. Поэтому астрологов с полным основанием можно считать предтечами современных исследователей операций. Уже в те времена было ясно, что для принятия решений требуется информация. Правда получить полную и точную информацию всегда было невозможно, поэтому пытались использовать информацию косвенную, представляющую совокупность некоторых признаков, например, расположение звезд, планет, фазы луны или другие приметы. Естественно, что эти процедуры были в сильной степени замешаны на различного рода мистических верованиях в знаки, символы и прочие таинственные предметы и явления.

Современная теория принятия решений освободилась от многих предрассудков и ложных представлений. Она основана на достаточно ясных и прогрессивных концепциях, хотя элемент веры и определенная ритуальная атмосфера при принятии решений в ней сохраняются. И это естественно, так как принимать решения требуется при неполной информации. Поэтому приходится изобретать различного рода принципы и полагаться на правдоподобные гипотезы, без веры в которые невозможно решиться на те или иные действия.

Одним из таких плодотворных принципов, заимствованным исследованием операций из теории игр, является принцип гарантированного результата. Этот принцип настолько важен в теории принятия решений, что недооценка его зачастую являлась причиной провала многих операций. Как известно, под операцией понимается целенаправленная

деятельность людей. Исходом операции является достижение или недостижение поставленной цели. Цель обычно формализуется в виде одного или нескольких функционалов (критериев), по значению которых судят об исходе операции. Принцип гарантированного результата при выборе стратегии поведения рекомендует, образно говоря, надеяться на лучшее, но рассчитывать на худшее. Так как операция обычно проводится в условиях наличия неконтролируемых факторов, то естественно предполагать, что может реализоваться наихудшая комбинация этих факторов. Таким образом, принцип гарантированного результата есть принцип оптимальности, который учитывает такую возможность, тем самым предохраняя оперирующую сторону от полностью неприемлемого исхода операции. В этом и заключается та гарантия, которую представляет оперирующей стороне этот принцип. Он дает ту оценку стратегии поведения оперирующей стороны, опуститься ниже которой она не имеет права. Важность этого принципа заключается так же в том, что в условиях отсутствия полной информации о процессе протекания операции он дает способ четко сформулировать цель операции и определить стратегии оперирующей стороны. В определенном смысле этот принцип можно назвать принципом разумного поведения. В особенности полезен и плодотворен он при проведении и планировании военных операций. Наполеону приписывают слова: “Если бы не существовало риска, то удача была бы уделом посредственности”. В связи с этим необходимо заметить, что принцип гарантированного результата не противоречит этому высказыванию. За оперирующей стороной остается право фиксировать те или иные вероятные значения неконтролируемых факторов, идя, тем самым, на определенный риск. Но исход операции в наихудших условиях реализации этих факторов она должна предвидеть.

Принцип оптимальности в совокупности с описанием множества стратегий, неопределенных и неконтролируемых факторов образует модель принятия решения при исследовании операций. Однако модель операции этим не исчерпывается. Необходимо еще уметь описывать всевозможные варианты ее протекания, окружающую среду и объекты, в ней участвующие. Другими словами, нужно уметь строить “физическую” модель операции. Обе упомянутые модели дополняют друг друга и в математическом смысле замыкают модель операции.

Определение операции как целенаправленного действия весьма широко и охватывает значительную часть деятельности людей. Операции могут сильно различаться по масштабу и сложности. Операцией является и относительно простая задача выбора маршрута перевозок

грузов, и весьма сложная проблема проектирования новой техники, например, боевых самолетов, и такая сложная, требующая затраты сил и средств целого государства, задача, как организация и посылка межпланетной станции на Марс. Часто большую и сложную операцию можно разбить на совокупность составляющих ее частных операций, и, вообще говоря, проблема такого разбиения также является операцией.

С математической точки зрения задачи исследования операций очень трудны и громоздки. Для их решения необходимо использование всей мощи современной вычислительной техники. С ростом совершенства ЭВМ сфера применения идей и методов исследования операций непрерывно расширяется, проникая во все новые отрасли человеческого знания и деятельности.

– Исследование операций – наука прикладная, она приносит конкретную практическую пользу.

– Исследование операций – наука фундаментальная, она образует опору, фундамент целенаправленной человеческой деятельности.

– Исследование операций – наука древняя, ее истоки уходят в далекое прошлое.

– Исследование операций – наука молодая, у нее еще все впереди.

Это стимулирует ее развитие.

Об исследовании операций и искусственном интеллекте

Г.С.Поспелов

I. Историческая справка. Считаю справедливым определение Н.Н.Воробьева (Ленинград), что "Исследование операций – это математическая теория принятия решений и практика их использования". Когда в начале 1964 г. была образована секция прикладных проблем при Президиуме АН СССР, и мы с Е.П.Поповым пришли в эту секцию (Попов – председателем, я – его заместителем), мы обнаружили, что в Академии Наук никто не занимается проблемой исследования операций, хотя уже существовала международная ассоциация по исследованию операций IFORS и ряд институтов Мин.обороны занимался этой проблемой. Мы подали докладную президенту АН СССР М.В.Келдышу, который откликнулся и выделил для работы по исследованию операций три института АН: Институт кибернетики в Киеве, Вычислительный центр АН СССР и Институт математики в СО АН. Был образован Совет АН по исследованию операций во главе с академиком В.М.Глушковым и составлен план работ АН и МО по исследованию операций. По каждой теме были определены институты АН и МО. План работ был утвержден М.В.Келдышем и начальником генерального штаба Л.В.Захаровым. Старые военные до сих пор помнят этот план "Келдыш – Захаров". В Институте кибернетики указанные работы по исследованию операций проводились под руководством академика В.М.Глушкова, в ВЦ АН под руководством академика Н.Н.Моисеева, а в Сибирском институте математики под руководством академика Ю.И.Журавлева.

II. Центральная проблема принятия решений. Как было сказано, принятие решений – это всегда творческий акт и использование математических методов для него привело к целому направлению – задачам оптимизации и их решению с помощью ЭВМ как в автономном, так и в интерактивном (диалоговом) режимах. Далее приводится система для решения задач оптимизации SOLVEX, где с достаточной полнотой приводится перечень проблем оптимизации.

III. Исследование операций и искусственный интеллект (ИИ). Термин ИИ – artificial intelligence (AI) был принят международной дортмунской конференцией в конце 50-х – начале 60-х годов. Несмотря на то, что термин (AI) полностью оправдан для машинной реализации таких творческих процессов как анализ и синтез музыкальных произведений, игры в шахматы и т.п. Калька (AI) – искусствен-

ный интеллект – у нас служит источником недоразумений и иногда просто отторгается.

Если бы термин ИИ понимался не как калька AI, а по существу, как использование компьютеров в творческой деятельности, то все недоразумения были бы сняты. В ИИ (будем так его называть) сформировалось несколько научных направлений. Укажем на связь этих направлений с ИО полностью.

IV. Компьютерная лингвистика. Одной из задач, которые решаются в этом научном направлении, является организация естественно-языкового интерфейса конечного пользователя с компьютером. В этом случае естественно-языковой текст, вводимый в ЭВМ с какой-либо целью, подвергается морфологическому, а затем синтаксическому и семантическому анализу. Затем, после решения этой проблемы во внутреннем представлении, осуществляется последовательно семантический, синтаксический и морфологический синтез и решение проблемы для конечного пользователя представляется на естественном языке. Разумеется, все это пригодно и для интерактивного диалогового режима.

V. Экспертные системы и инженерия знаний. SOLVEX и другие аналогичные системы оптимизации образуются на основе триады: математическая модель, алгоритм, программа. (Далее условно называем реализацию этой триады процедурными знаниями.) Процедурные знания недостаточны для ответственного акта принятия решения. Лицо, принимающее решение, (ЛПР) неизбежно должно учитывать фактуальные или экспертные знания, относящиеся к данной предметной области, и не формализуемые на основе упомянутой триады. Фактуальные знания реализуются на ЭВМ на основе логико-лингвистических моделей, таких как семантические сети, фреймы, продукционные системы. Чаще всего для формализации фактуальных или экспертных знаний используются продукционные модели. Носителями фактуальных экспертных знаний являются крупные специалисты эксперты в данной предметной области. Процесс формирования знаний экспертов осуществляется с помощью так называемого инженера по знаниям, а вся процедура формализации знаний носит название инженерии знаний. В результате этой процедуры образуется экспертная система. Подчеркнем здесь, что любая экспертная система должна содержать подсистему объяснений или, более общо, систему доверия. Система объяснения обеспечивает уверенность пользователя экспертной системы, т.е. что он вместе с компьютером правильно пришел к тому или иному результату. Подробнее об экспертных системах можно прочитать в [1], [2]. Экспертные системы – это эффективный способ применения ком-

пьютеров в таких фундаментальных и прикладных науках как, например, медицина, где построения математических моделей затруднено или даже невозможно. Нужно отметить, что имеются два класса экспертных систем. Назовем их условно обычными и экспертными системами реального времени. В случае обычных систем параметры объекта экспертизы за время сеанса экспертизы не меняются. Сюда относятся диагнозы заболеваний, поиски неисправностей в технической системе и т.п. В противоположность этому экспертные системы реального времени позволяют выявить состояние объекта экспертизы в интервале времени, когда параметры объекта меняются. Сюда в первую очередь относятся разнообразные боевые операции. Экспертные системы реального времени разрабатываются в Научном совете по ИИ и на кафедре автоматики и телемеханики ВВИА им. проф. Жуковского.

Нужно еще упомянуть о появившихся недавно так называемых критикующих системах. В критикующих экспертных системах реализуется парадигма "в споре рождается истина". Такая ситуация встречается при коллективном принятии решений (как пример – консилиум врачей у постели больного). В этом случае каждый участник совещания или консилиума высказывает свою точку зрения так, что в конце концов все они приходят к единому решению. С критикующими экспертными системами связывают представление об инженерии критики.

VI. Принятие решений и логический вывод. Решение в этом случае формируется в результате логического вывода: дедуктивного, индуктивного и абдуктивного.

Дедуктивный вывод (от общего к частному) в немонотонном варианте, когда аксиомы меняются в процессе вывода, лежит в основе так называемой логики здравого смысла.

Индуктивный вывод (от частного к общему) был развит в работах Френсиса Бэкона. С помощью программы "Бэкон", разработанной за рубежом, был переоткрыт целый ряд нефизических законов. В середине XIX-го века появились разработки в области индуктивного вывода Дж.С. Миля. В.К.Финном и его сотрудниками использование вычислительной техники применительно к идеям Д.С.Миля привело к становлению так называемого ДЕМ-метода. Здесь следует указать на решение проблемы автоматического построения гипотез по экспериментальным данным. Это крайне важно для любых видов разведки.

И, наконец, абдуктивный вывод – это вывод по аналогии.

VII. Ситуационное управление и семиотическое моделирование [3]. Здесь мы находимся на передовых рубежах во всем мире. В случае ситуационного управления в какой-либо предметной области мы

встречаемся с огромным количеством микроситуаций, которые затем группируются в небольшое число макроситуаций, и каждой макроситуации соответствует свое решение. Типичный пример – дорожный перекресток, когда группировка множества микроситуаций приводит к решениям: красный свет, желтый свет, зеленый свет. Объектами ситуационного управления являются, например, действия подразделения сухопутных войск. Пытаться использовать для объектов ситуационного управления математическое моделирование вряд ли возможно. Здесь желательно использовать семиотическое моделирование.

VIII. Нечеткие системы – это огромная, быстро развивающаяся область ИИ [4]. Здесь лидирует Япония, за ней Германия, США и Китай. Мы, к сожалению, отстаем. Появление проблемы нечетких систем связано с существенным различием между языком человека и языком компьютера. Язык компьютера биполярен – горячо-холодно, высоко-низко. Здесь нет, как в языке человека промежуточных градаций, не слишком горячо, но и не слишком холодно. Это различие между языком машины и языком человека будет определено сдерживать процесс информатизации общества. Мостик между языком машины и языком человека перебросил Л.Заде, разработав теорию размытых множеств и тем самым заложив основы построения нечетких систем.

Литература

1. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам. Москва. Мир. 1989.
2. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. Москва. Наука. 1988.
3. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика. Москва. Наука. 1986.
4. Прикладные нечеткие системы. Под ред. Т.Тэрано, А.Асаи, М.Сугэно. Москва. Мир. 1993.

Исследование операций и математическое моделирование

А.А. Петров

Существует несколько преданий, как возникло исследование операций. По одному из них исследование операций возникло в конце 30-х годов по названию исследовательской группы operations research в английских ВВС, которая занималась планированием использования радиолокационных станций в системе ПВО. По другому – исследование операций возникло в 1944 г. на юго-восточном азиатском театре военных действий Второй мировой войны. Для повышения боеспособности подразделений американской армии была сформирована группа, в которую входили военный, психолог, социолог, менеджер, математик. Перед ней была поставлена задача исследовать конкретные ситуации в конкретных подразделениях и выдавать рекомендации, как повысить боевую эффективность подразделения. Говорят, что первой рекомендацией группы исследования операций было увеличить количество солдатских умывальников, ибо именно очереди к умывальнику задерживали приведение подразделения в боевую готовность.

Так оно было или иначе, но исследование операций было англо-американским изобретением, преследующим чисто прагматические цели повышения эффективности целенаправленной деятельности в конкретной обстановке. Методы исследования операций получили широкое распространение в военной области приложений, а потом распространились в сферу бизнеса. В США, например, возникли фирмы, которые специализировались на выполнении заказов компаний, имевших низкую экономическую эффективность. Смысл заказа – проанализировать причины низкой эффективности и дать рекомендации, как ее повысить. Такого рода консультационные фирмы имели достаточную прибыль, что в американских условиях служит надежным индикатором хорошего качества методологии исследования операций, которую они применяли.

Таким образом, исследование операций возникло как методология анализа целенаправленной деятельности более или менее сложной организационной системы в более или менее сложной обстановке. Методология возникла на позитивистской основе, свойственной англосаксонскому мышлению, и соединяла в себе рациональные приемы, наработанные в разных отраслях наук. Потому исследование операций очень быстро и тесно связалось с системным анализом. Известно, что философы развивают свои системы взглядов, используя раз-

ный материал: одни – исторический, другие филологический, третьи – экономический. По-моему, системный анализ развивает философию позитивизма на материале социальной практики. Подходы системного анализа кажутся тривиальными в своей общности, но дают хорошую основу управленцам-практикам при принятии решений в сложных ситуациях. Оторванный от практики управления, системный анализ становится схоластической системой, порождающей тривиальные практические советы. Так дело обстоит у нас, потому что позитивизм, по-видимому, чужд российскому образу мышления. Характерный анекдот бытует среди наших научных работников. Механику, физику и системному аналитику предложили измерить высоту башни с помощью барометра-анероида. Механик предложил сбросить барометр с башни, засечь время падения и по известной формуле кинематики вычислить высоту. Физик предложил замерить давление у основания и на вершине башни и оценить высоту по барометрической формуле. Системный аналитик решил задачу по-своему: "Пойду продам барометр, куплю водки, выпью со сторожем – он мне и скажет, какая высота у башни". Современному ученому-естественнику, пока он не имеет вкуса к философским размышлениям, системный анализ кажется тривиальным в применении к области его профессиональной деятельности.

Системный анализ обращен, главным образом, к тем, кто на практике занимается выработкой ответственных решений в сложных ситуациях и принимает их. Когда системный анализ становится философией лица, принимающего решения, тот обращается к научным методам подготовки решения, прежде чем принимать его. Исследование операций предлагает лицу, принимающему решения, научные методы оценки сравнительной эффективности альтернативных вариантов решения. В этом отношении исследование операций входит разделом в теорию управления. Однако, прежде чем исследование операций стало научной дисциплиной, оно прошло определенную эволюцию.

Всякая целенаправленная деятельность начинается с планирования. Практически каждый, кому приходится планировать, количественно выражает сравнительные результаты применения того или иного варианта плана действий. В конце 30-х годов Л.В. Канторович поставил и решил задачи об оптимальном раскрое и об оптимальной загрузке станочного участка, заложив основы линейного программирования. В 1942–43 гг. США и Англия планировали операцию вторжения в Европу. Для обеспечения операции было необходимо переправить через Атлантику огромное количество людей и грузов. Голландский ученый Т. Купманс, бежавший от немцев в США, предложил

постановку и решение задачи об оптимальных перевозках. Это была транспортная задача линейного программирования. Работы Канторовича и Купманса положили начало применению математических методов в планировании. Затем свой вклад в развитие математических методов планирования и управления внесли Л.С. Понтрягин, сформулировавший принцип максимума, и Р. Беллман, сформулировавший принцип оптимальности динамического программирования. Эти методы наряду с другими вошли в научный инструментарий исследования операций. Если взять учебное пособие по исследованию операций 60-х годов, то в нем найдешь стандартный набор, который состоит из общего методологического введения и математических разделов: условия максимума функции и множители Лагранжа, линейное программирование, матричные антагонистические игры, вариационное исчисление, оптимальное управление и динамическое программирование, управление запасами в условиях случайного спроса. Математические разделы перемежаются примерами применения соответствующего математического аппарата. Это был, так сказать, джентльменский набор исследователя операций.

Крупный вклад в развитие содержательных постановок задач и математических методов исследования операций внес Ю.Б. Гермейер в конце 60-х — начале 70-х годов. Вместе со своими учениками Ю.Б. Гермейер систематически исследовал влияние условий информированности на принятие решения. Он сформулировал принцип гарантированного результата, обсуждал его в широком контексте принципов рационального выбора в условиях неопределенности и пропагандировал как в среде ученых, так и в среде практиков. По моему мнению, после работ Ю.Б. Гермейера сформировались современная проблематика и подходы исследования операций, которые находят приложения в задачах автоматического управления, автоматизации проектирования, эколого-экономического планирования и компромисса.

Становление исследования операций как теорий принятия рациональных решений было тесно связано с развитием математического моделирования. В нашей стране с практическим применением исследования операций дело обстояло неважно, но в области математических моделей и методов принятия решений были получены замечательные результаты. Я постараюсь обсудить некоторые вопросы развития математического моделирования в связи с исследованием операций.

Естественные науки издавна используют математические методы анализа объектов своих рассматриваний и достигли всем известных замечательных результатов. Прикладная математика, питаясь содержа-

тельными проблемами естественных наук, развила мощные общие методы анализа широких классов явлений природы. Однако о математическом моделировании как о самостоятельной научной дисциплине стали говорить сравнительно недавно – когда оно постепенно стало превращаться в современную технологию применения методов прикладной и, особенно вычислительной, математики, методов организации диалога с компьютером для решения сложных задач анализа и синтеза систем и решений в различных областях приложений. Три характерных признака отличает математическое моделирование: во-первых, предмет исследования – сложная система или ситуация, в которой необходимо оценить эффективность разных вариантов решений и отобрать среди них эффективные; во-вторых, междисциплинарный характер исследований – в них участвуют специалисты, понимающие существо исследуемой проблемы, прикладные математики, имеющие опыт описания и анализа нестандартных проблем; в-третьих, компьютерная технология обработки информации – сочетание разнообразных аналитических, численных и эмпирических методов анализа и синтеза сложных систем и решений в интегрированном диалоговом комплексе проведения вычислительных экспериментов с математическими моделями исследуемой системы или ситуации. Цель математического моделирования – добиться регулярного эффективного сочетания опыта разных специалистов на базе современных математических методов и компьютерных технологий для решения задач научно-технического, экономического и социального прогресса. Это – та же цель, ради которой начинали исследование операций, только теперь для достижения ее привлекаются современные методы прикладной математики и компьютерные технологии обработки информации.

История развития математического моделирования – это история проникновения математических методов описания и анализа последовательно в новые области механики, физики, техники, химии, биологии, экономики и т.д. Математический анализ Ньютон создавал, исследуя движение небесных тел, строя модель мира. Ньютон не только закладывал основы анализа, он создал натурфилософию. Последующие двести лет методология Ньютона успешно распространялась на новые области механики и физики, одновременно стимулируя возникновение новых разделов математики.

В XVII-XIX вв. наука проникала в суть явлений природы, чтобы преобразовать силы природы в производительные силы общества. Сами общественные потребности выдвигали на первый план задачу анализа и постоянно ставили ее перед наукой. Целью анализа было пре-

одолеть видимую сложность явлений окружающего мира, разложить сложные явления и дойти до простых элементарных причин. Были сформулированы основные понятия и принципы, отражающие фундаментальные свойства движения материи, проанализирован широкий класс явлений природы и разработаны точные методы прогнозирования показателей, которые отражают их существо. Под влиянием естественных наук совершенствовалось инженерное дело, куда с середины XIX века начала проникать культура математического моделирования и анализа. Успехам математического моделирования обязаны многие выдающиеся достижения инженерной мысли.

Инженер конструирует агрегат, который дал бы возможность преобразовывать силы природы в интересах целенаправленной деятельности людей. Чтобы синтезировать агрегат, инженер должен знать законы взаимодействия сил природы. Чтобы точно рассчитать конструкцию, предсказать значения ее рабочих параметров, он должен владеть методами математического моделирования. Один из первых и самых ярких примеров успешного применения математического моделирования в инженерном деле дают исследования регулятора Уатта, выполненные Дж.Максвеллом и И.А.Вышнеградским. Математическая модель паровой машины с регулятором Уатта позволила описать процесс регулирования хода паровой машины и проанализировать влияние на него конструктивных параметров регулятора. Тем самым появилась возможность рассчитать регулятор, который обеспечивал бы нужный характер хода машины – сделал бы его устойчивым.

Здесь стоит обратить внимание на одно важное обстоятельство: решение задачи анализа системы дало возможность синтезировать систему с нужными свойствами. Задача синтеза системы родилась из задачи анализа.

Работы Максвелла и Вышнеградского заложили основы теории автоматического регулирования – одного из главных разделов современной теории управления. Фундаментом теории управления служит математическое моделирование, именно оно обеспечило успех при создании современных сложных управляемых систем, таких, как например, современные ракетно-космические комплексы. В свою очередь, потребности теории управления, широко использующей идеи исследования операций, ставят новые задачи в области математического моделирования. В современной теории управления на первый план выходит задача синтеза оптимального варианта управляемой системы. Предметом изучения становится сложная управляемая система.

Управляемая система состоит из объекта управления и системы

управления, которую для простоты назовем регулятором. Управляемая система создается ради достижения заданной цели в условиях, которые заранее точно неизвестны. Система взаимодействует с внешней природной средой, состояние которой известно неточно. Она подвержена сознательным внешним воздействиям, которые создателям системы заранее неизвестны или известны неточно. Иногда имеется некоторая априорная информация о внешних воздействиях, иногда априорно известно, что в процессе функционирования системы можно получить дополнительную информацию.

Чтобы решить задачу синтеза оптимального варианта системы, недостаточно математических моделей процессов в объекте управления и в регуляторе. Математические модели объекта управления с регулятором дают возможность рассчитать действие управляемой системы при заданных значениях конструктивных параметров и заданных условиях функционирования системы.

Чтобы решить задачу синтеза, надо смоделировать процесс перебора вариантов инженерных решений при создании управляемой системы. Во-первых, надо описать множество возможных комбинаций конструктивных параметров системы. Во-вторых, надо выразить степень соответствия действия системы поставленной цели при заданных конструктивных параметрах и заданных условиях функционирования. Набор количественных оценок соответствия называют критериями качества системы. В-третьих, надо смоделировать предпочтения создателей системы. При фиксированных условиях функционирования модель предпочтений указывает, как сравнивать два набора значений критериев и дает правило отбраковки того набора, который "хуже". Иногда модель предпочтений называют правилом отбраковки. В-четвертых, надо по априорной информации об условиях функционирования системы, учитывая цель системы, смоделировать характерные, представительные (по отношению к цели) гипотетические условия функционирования системы. Такая модель основана на принципе гарантированного результата, который гласит: значения критериев, вычисленные при гипотетических условиях, должны быть не хуже (в смысле, который зависит от цели системы), чем значения критериев, вычисленных при любых априори допустимых условиях функционирования. Известный пример: система рассчитана на однократное применение, о помехе известно, что возможные значения ее принадлежат некоторому множеству, а качество системы оценивается одним числовым критерием – чем лучше система, тем больше значение критерия. В этом случае принцип гарантированного результата требует к каждому набору

конструктивных параметров в качестве характерного значения помехи приписать то, при котором значение критерия минимально. Все другие оценки качества будут необоснованы.

Априорную информацию об условиях функционирования системы и модель использования априорной информации в соответствии с принципом гарантированного результата называют моделью информированности. По математической модели информированности можно сформировать характерные условия функционирования системы. При заданной комбинации конструктивных параметров и характерных условиях функционирования с помощью математической модели объекта управления и регулятора можно вычислить значения критериев качества. Перебирая возможные комбинации конструктивных параметров, по правилу отбраковки можно отобрать неуправляемые (по отношению к цели и условиям информированности) варианты системы. Их и называют оптимальными. Описание множества возможных комбинаций конструктивных параметров, описание критериев качества системы, модель информированности и правило отбраковки образуют модель принятия решения [1].

Чтобы решить задачу анализа управляемой системы, достаточно моделей объекта управления и регулятора. Чтобы решить задачу синтеза оптимального варианта, к модели системы надо добавить модель принятия решения. Математические модели принятия решения формализуют отдельные стороны целенаправленной деятельности в инженерно-технической области: формулировку целей и описание информированности в момент принятия решения, множество возможных способов достижения цели, сознательное предпочтение одного варианта другому. Модели принятия решения обобщают опыт, накопленный в разных конкретных отраслях техники. Задача синтеза системы возникает из опыта многократного решения задач анализа системы, потому что решение задач анализа дает возможность глубже понять свойства системы и взаимодействия ее со средой. Накопленный опыт обобщается и выражается в наборе тактико-технических требований на проектируемую систему. А это не что иное, как набор критериев, характеризующих качества системы в типичных, представительных ситуациях. Эмпирически установлено, что система, у которой тактико-технические характеристики хуже, чем у другой системы, будет хуже практически во всех ситуациях. Математическим моделированием проектируемой системы удастся обосновать результаты эмпирического опыта или даже заменить эмпирический опыт. Приведу два примера.

Первый из них – из области САПР [2]. Накопленный опыт и успе-

хи применения математического моделирования при конструировании сложных управляемых движущихся объектов в свое время поставили на повестку дня новую методологическую проблему. Как с помощью ЭВМ обрабатывать информацию, необходимую для принятия таких сложных решений как выбор эффективного варианта проекта сложной технической системы. И возникла проблема – создать автоматизированные системы проектирования сложных технических систем (СА-ПР). Одна из первых САПР была предназначена для проектирования маневренных самолетов, и это было не случайно. Авиастроение традиционно тесно связано с механикой, в которой высока культура математического моделирования.

В Вычислительном центре РАН под руководством академика П.С. Краснощекова была создана САПР маневренных летательных аппаратов. Она была предназначена для выбора эффективных вариантов компоновки самолета на самом ответственном этапе – эскизного проектирования. Разработанная САПР формировала эффективные варианты облика самолета по набору тактико-технических характеристик (ТТХ), принятых в КБ. Перед разработчиками САПР стояла задача оценки боевой эффективности принятого варианта самолета, решать которую очень трудно, потому что для этого необходимо симитировать разнообразные ситуации боя самолета с гипотетическим противником. Возникла идея описать множество всех возможных движений самолета в фазовом пространстве и считать тот самолет лучше, у которого шире множество возможных движений. Таким образом, задача отбраковки была сведена к задаче описания множества допустимых движений. Решение показало, что множество допустимых движений описывается набором параметров, которые практически совпадают с принятыми в КБ тактико-техническими характеристиками. Следовательно, у кого лучше ТТХ, у того шире множество допустимых движений и больше шансов выиграть бой. Анализ системы с помощью математической модели прояснил постановку задачи синтеза.

Второй пример из области экономики [3]. И здесь давно используются математические методы, однако прикладное значение их в экономике значительно меньше, чем в технике. Не в последнюю очередь это объясняется трудностями математического моделирования экономических систем. Тем не менее анализ математических моделей и здесь дает нетривиальные качественные результаты. К одному из них относится мой пример.

Идея общего экономического равновесия относится к числу фундаментальных в политической экономии, потому что она дала хороший

подход к изучению механизмов самоорганизации экономических систем. Исследование механизмов выравнивания совокупного спроса потребителей и предложения производителей в процессе взаимных обменов прояснило, как складываются цены, используются ресурсы и распределяются материальные блага в разных условиях. Идея равновесия не могла возникнуть при изучении микроэкономических явлений: отдельных актов обменов между индивидуальными потребителями и производителями благ. Равновесные свойства проявляется у макроэкономических структур, которые в экономике называются экономическими агентами. Поэтому проблема равновесия оказывается тесно связанной с проблемой агрегирования микроэкономических описаний.

В математической экономике существуют две фундаментальные проблемы: агрегирования описания потребительского спроса и агрегирования описания производства. Исходное описание потребительского спроса задается зависимостями количества приобретаемых товаров от их цен – функциями спроса. Агрегированное описание потребительского спроса на группу товаров задается индексом потребления и двойственным ему индексом цен, которые удовлетворяют априорным условиям, формализующим достаточно разумные экономические соображения. Проблема заключается в том, чтобы найти условия существования индекса потребления и индекса цен. Сформулированы необходимые и достаточные условия существования индексов, т.е. агрегируемости функций потребительского спроса. Среди них есть знаменитое условие интегрируемости функций спроса Фробениуса – условие существования интегрирующего множителя для дифференциальной формы, составленной по функциям спроса. Если условия агрегируемости выполнены, то потребительский спрос можно описать скалярной функцией полезности.

Исходное описание производства задается технологическим множеством – всеми допустимыми комбинациями затрат производственных факторов и выпусков продуктов. Например, если производство описано неоклассическим межотраслевым балансом Леонтьева, то в терминах выпусков конечных продуктов технологическое множество оказывается замкнутым, ограниченным, выпуклым множеством, которое зависит от количеств используемых в производстве первичных ресурсов. Агрегированное описание производства задается производственной функцией – зависимостью максимальных производственных возможностей от первичных ресурсов. Если выпускается единственный конечный продукт, то максимальные производственные возможности характеризуются максимальным выпуском этого продукта. Если же выпускают

ся несколько конечных продуктов, то максимальные производственные возможности характеризуются паретовской частью границы технологического множества. Возникает проблема агрегированного описания. Если существует индекс потребления – скалярная функция, определенная на конечных продуктах, – то производственную функцию можно определить как зависимость максимума индекса потребления от количеств первичных ресурсов. Показано, что в точке максимума спрос на конечные продукты равен их предложению, т.е. действительно агрегированному описанию с помощью производственной функции соответствует детальное равновесие на рынках конечных продуктов. Если условия интегрируемости функций потребительского спроса не выполнены, то индекса потребления не существует. Возникает вопрос, каково минимальное количество индексов в агрегированном описании потребительского спроса? Ответ на вопрос сводится к решению задачи Картано о приведении дифференциальной формы к наименьшему числу переменных. Наименьшее число переменных равно классу дифференциальной формы. Однако, если поставить задачу Кратано при дополнительном условии, что должны существовать обратные функции спроса – аналоги индекса цен, – то минимальное число переменных удвоится [4].

Рассмотрим задачу об агрегированном описании производства при нарушении условий интегрируемости функций потребительского спроса. Если не требовать существования обратных функций спроса (аналогов индекса цен), то в пространстве индексов спроса максимальные производственные возможности характеризуются паретовской частью границы технологического множества. Если же потребовать существования обратных функций спроса, то будет задано поле направлений в агрегированном описании спроса. И показано, что равновесию спроса и предложения соответствует точка паретовской части границы, в которой нормаль совпадает с вектором поля, определенного обратными функциями спроса.

В первом случае описание было "переагрегировано", что привело к потере информации. В результате задача об агрегированном описании производства свелась к задаче многокритериальной оптимизации, решением которой является вся паретовская часть границы технологического множества. Во втором случае размерность агрегированного описания удвоена, но информация не была потеряна. Векторное поле, заданное обратными функциями спроса, дает возможность свести задачу агрегированного описания производства к задаче обобщенного программирования и выбрать определенную точку на паретовской гра-

нице технологического множества, которая характеризует максимальные производственные возможности. Анализ математической модели системы дал возможность уточнить постановку задачи оптимизации.

Литература

1. Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. М.: Изд-во МГУ, 1983.
2. Краснощеков П.С., Петров А.А., Федоров В.В. Информатика и проектирование. М.: Знание, 1986. 48с.
3. Петров А.А. Экономика. Модели. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1996. 251с.
4. Петров А.А., Шананин А.А. Системный анализ экономики: проблема агрегированного описания экономических отношений // Математическое моделирование: Методы описания и исследования сложных систем / Под ред. А.А.Самарского, Н.Н.Моисеева, А.А.Петрова. М.: Наука, 1989. С.121-156.

1. Введение

За последние десятилетия первоначальная тематика исследования операций была в значительной части "разобрана" множеством новых дисциплин, с различных сторон изучающими целенаправленную человеческую деятельность. Главным достижением исследования операций оказались принципы и методы описания действий разумного субъекта. Понятия, разработанные в исследовании операций, стали тем языком, на котором обсуждают свои проблемы математическая экономика, теория выбора, искусственный интеллект и многие другие новые дисциплины.

Вот уже около 20 лет наша исследовательская группа, которой руководит член-корр. А.А.Петров, занимается математическим моделированием экономики. За это время были построены динамические модели экономики классического рыночного типа, плановой централизованно регулируемой экономики, смешанной экономики и экономики России переходного периода. Эти модели и результаты их исследования подробно описаны в монографии [1]. Прежде, чем говорить об этих результатах хотелось бы обсудить основы нашего похода к моделированию экономики, поскольку они базируются на принципах исследования операций. При этом основные понятия исследования операций получают иногда неожиданную интерпретацию, возникают специфические трудности и новые возможности, которые представляют интерес и для смежных областей. Хотелось бы также обратить внимание на многочисленные теоретические проблемы, с которыми мы постоянно сталкиваемся, но которые пока не нашли своего решения.

2. Экономика как система принятия решений

С давних времен человек не изготавливает и не добывает всего, что потребляет. Разные люди делают разные дела и возникает необходимость координировать их усилия. В обществе возникает система управления, которая определяет, что, где, когда и в каком количестве производить и как произведенное использовать. Эта управляющая система и

называется экономикой. Задача экономики чудовищно сложна: в большой современной стране сотни тысяч производителей (заводов, фабрик, ферм, мастерских) выпускают сотни миллионов (!) наименований продуктов. Эти продукты распределяются между сотнями миллионов потребителей миллионами распределительных пунктов (магазинов, баз, рынков). Подчеркнем, что ученые экономисты исследуют не сами физические процессы производства распределения и потребления, а то, какой из различных технологически возможных путей осуществления этих процессов выбирает общество.

Важнейшей особенностью экономики является то, что эта система управления всегда распределенная. Как говорил Ф.Хайек: "Экономика не уместится в одной голове". Это остается справедливым даже во время самого стремительного роста мощи систем обработки информации. Видимо дело в том, что когда появляется новое средство переработки информации, оно становится частью объекта управления - процессов производства и распределения, и рост возможностей управления и контроля сводится на нет ростом сложности управляемой системы. Так или иначе, но даже в самых централизованных экономических системах управляющий центр вынужден передавать значительную часть функций по подготовке информации и выполнению решений, а значит и свободу выбора, нижним уровням управляющей иерархии. Поэтому в обществе возникает довольно четкая система взаимосвязанных экономических ролей (рабочий, торговец, управляющий, покупатель и т.п.).

С каждой ролью связана обязанность принимать решение по определенному кругу вопросов, а исполнители ролей (физические или юридические субъекты, индивидуумы или коллективы) являются лицами, принимающими решения. Заметим, что один и тот же человек обычно участвует в исполнении нескольких ролей (например, предприниматель одновременно является потребителем). Набор и связи ролей отличают одну экономическую систему от другой. Наш подход к моделированию экономики состоит в том, чтобы максимально корректно описать эту совокупность взаимосвязанных актов выбора, принятия решения множеством экономических субъектов. Для описания процесса принятия решения исследование операций предлагает прежде всего ответить на вопросы:

Что субъект может? (множество стратегий),

Что субъект хочет? (цели, критерии оценки, интересы),

Что субъект знает? (условия информированности).

Посмотрим, как ответить на эти вопросы применительно к субъекту

2.1. Что может делать экономический субъект?

Возможности выбора субъекта определяются его ролью. В основном эти возможности сводятся к перераспределению и преобразованию некоторых ресурсов (материальных или финансовых активов). Например, потребитель выбирает, сколько денег сберечь, а сколько - потратить и какие товары купить. Производитель выбирает, сколько произвести, и какие из доступных ему технологий использовать для этого. Поэтому важнейшими характеристиками состояния субъекта служат запасы активов, которыми он распоряжается (денег, продуктов, ресурсов), а важнейшими управляемыми переменными - потоки активов. Балансы, связывающие изменения запасов с соответствующими потоками (законы сохранения активов) ограничивают возможные действия субъекта.

Особое место занимают финансовые активы (деньги, займы, ценные бумаги и т.п.). В современной экономике подавляющая часть этих активов представляет собой обязательства, данные одним субъектом (эмитентом, заемщиком) другим субъектам (держателям, кредиторам). Например, акции - это обязательства фирм, депозиты - обязательства банков, а наличные деньги - обязательства Центрального банка¹.

Формально такие активы (в отличие от материальных) не имеют источников и стоков: сумма запасов обязательств у держателей составляет пассив эмитента, который естественно рассматривать как отрицательный запас. Поэтому сумма всех запасов финансового актива в системе оказывается тождественно равной нулю². Эмиссия финансовых активов регулируется различными ограничениями кредитоспособности, которые привязывают финансовые активы либо к материальным активам, либо к обязательствам особо надежных кредиторов. Так подавляющее большинство современных валют обеспечиваются верой в то, что правительство США будет делать долги в меру реального роста потенциала страны и аккуратно их платить.

Возможности преобразования активов ограничены известными субъекту способами производства и потребления. Описание этих способов

¹Отметим, что исторически кредитные деньги старше золотых по крайней мере на 1000 лет. Первые зафиксированы в полном масштабе в XVIв. д.н.э. у ассирийских торговцев в Малой Азии. Вторые пока не обнаружены ранее, чем в VIIв. д.н.э. (Лидия и Эгина).

²Это основное правило двойной (итальянской) бухгалтерии - гениального изобретения ломбардских банкиров эпохи Ренессанса.

также является характеристикой состояния субъекта. Ясно, что перераспределение потоков активов, а часто и выбор технологий, не определяются волей одного субъекта. Даже, чтобы даром отдать что-либо, необходимо как минимум согласие получателя. Поэтому решения субъект в экономике принимает в условиях неопределенности и конфликта.

Нужно, конечно, всегда помнить, что стройная системы четко очерченных ролей с определенными возможностями выбора существует лишь в нашей теории. Человек постоянно ищет новые технологии, новые виды активов, новые операции, непрерывно изменяя множество технологий и, в конечном счете, всю систему ролей, т.е. систему экономических отношений. Увы, мы до сих пор не имеем ни аппарата, ни идей, чтобы внятно и плодотворно описывать эти, наверное самые важные процессы.

2.2. К чему стремится экономический субъект?

В исследовании операций важное место занимает процедура выявления предпочтений, критериев, которыми оперирующая сторона оценивает исход операции. Предполагается, что эти предпочтения могут быть в принципе какими угодно, но последовательными (в частности транзитивными) и выразимыми количественно. В экономике дело обстоит иначе. С одной стороны, высказываются обоснованные сомнения в рациональности поведения экономических субъектов ³. С другой стороны, опыт теории игр и исследования операций показывает, что если интересы участников конфликта хотя бы отчасти заранее не согласованы друг с другом и имеется возможность обмена информацией, то ожидать какого-то регулярного исхода конфликта не приходится.

Большинство исследователей согласны, что в экономике действует особый "сверхмеханизм" отбора и согласования поведения. Иногда его действие ясно. Например, можно показать [1,2], что в рыночной экономике торговец или производитель, не обращающий внимания на прибыль, разорится быстрее, чем тот, который стремится максимизировать прибыль. В других случаях дело обстоит сложнее. Например, эмпирически установлено, [1,3], что большие совокупности потребителей в течение длительного времени ведут себя как один потребитель, максимизирующий некоторую функцию полезности. Но для отдельных потребителей подобной рациональности не наблюдается!

³Хорошо известны психологические эксперименты, выявляющие нетранзитивность предпочтений человека.

Таким образом, механизмы согласования интересов в обществе сложны и нетривиальны. Этим же, видимо, и объясняется тот любопытный факт, что несмотря на явную регулярность и "разумность" поведения субъектов в экономике (вспомните, например, как быстро российские потребители приспособились жить в условиях инфляции), интересы субъектов как правило не удается выявить прямыми опросами. Например, бизнесмены, отвечая на вопрос о правилах, которыми они руководствуются при осуществлении инвестиций, либо ссылаются на разные частные обстоятельства, либо начинают цитировать учебники экономики, которые именно в этом вопросе особенно беспомощны.

Таким образом, в экономике, в отличие от исследования операций, цели, интересы, критерии успеха не являются для исследователя внешним, заданным условием задачи. Напротив, то или иное представление об интересах субъектов является важнейшей содержательной гипотезой исследователя и должно быть подвергнуто проверке на внутреннюю согласованность и эмпирическую достоверность. И снова здесь приходится с сожалением говорить об отсутствии аппарата и идей описания процессов формирования и передачи интересов в обществе. (То, что интересы могут достаточно быстро и массово меняться, мы хорошо узнали в последние 10 лет на собственном опыте.)

Заметим, что только когда интересы и/или множество стратегий меняется, можно заметить различие между целенаправленным, рациональным поведением и регулярным, привычным выбором, который формально можно задать некоторым экстремальным (вариационным) принципом. Если, скажем, множество стратегий меняется, то целенаправленное поведение меняется предсказуемо, а привычное - либо не изменяется, либо просто разрушается.

2.3. Что знает экономический субъект?

Как и в исследовании операций, этот вопрос в математической экономике наиболее тонкий, сложный и острый. Однако, в экономических исследованиях он приобретает особую специфику. Исследование операций традиционно много внимания уделяло вопросу сознательного сокрытия информации оперирующими сторонами. В экономике, разумеется, многое держится в секрете, но более типичным и важным случаем является не недостаток, а, напротив, избыток информации в принципе доступной субъекту. Как уже говорилось, в современной экономике обращаются сотни миллионов наименований продукции. В то же время экономика - сильно связанная система. Нетрудно проследить зависимость между,

скажем, потребностью в чилийской меди и потребностью в новозеландской баранине (через занятость горняков) или между успехами японских инженеров в микроэлектронике и спросом на услуги итальянских дизайнеров (через разработку новых моделей автомобилей в Америке и Германии).

Ясно что ни потребитель, ни производитель, ни торговец не может оперировать всей совокупностью этих бесчисленных связей. Возникает специфическое информационное ограничение, для выражения которого у нас, увы, нет подходящего аппарата. Именно информационное ограничение - принципиальная невозможность отследить всю совокупность непрерывно изменяющихся, взаимосвязанных потребностей и технологических возможностей - и было с моей точки зрения главной причиной неудачи централизованного планирования экономики. Заметим, что от планирования как государственного, так и внутрифирменного, которое было весьма популярно на Западе в 50-70-е годы, в 80-е годы практически отказались. Причиной видимо было, с одной стороны резкое усложнение экономических связей вследствие компьютеризации, а с другой - потеря общей долгосрочной перспективы развития, вызванная энергетическим и экологическим кризисом.

Таким образом, всякая сколь-нибудь устойчивая экономика должна преодолевать информационное ограничение, должна самоорганизоваться так, чтобы субъект мог успешно достигать своих целей, опираясь лишь на информацию о сравнительно небольшом количестве агрегированных показателей состояния системы. Это, в свою очередь, дает надежду, что и исследователь экономики может успешно пользоваться сравнительно простыми агрегированными моделями. Более того, я полагаю, что большинство экономических законов можно было бы вывести из требования агрегируемости экономических отношений.

Главным средством свертывания информации в экономике являются деньги. Мне кажется крайне неудачным расхожее сравнение финансовой системы с кровеносной системой организма. Функция крови - разносить "субъектам" ресурсы и передавать специфические сигналы о состоянии системы. Главная функция денег - давать неспецифическую, соизмеримую скалярную оценку потенциальных возможностей качественно разнородных субъектов. Более того, деньги дают эту оценку в трансферабельной, квазивещественной форме, удовлетворяющей закону сохранения. В этом смысле деньги уникальны. В других сложных системах: космологических, экологических, биологических, технических, лингвистических, ничего подобного нет.

Впрочем, такую скалярную оценку экономика вырабатывает не все-

гда. В современной экономике нет, например, денежной оценки знаний. С этим связаны, с одной стороны бесконечные проблемы с авторскими правами, а с другой - очевидная убогость всех известных мне попыток включить в модели описание знаний как результата и фактора производства.

Итак, описывая информированность субъекта экономики, мы должны указать, какими агрегированными показателями состояния экономики пользуется субъект при принятии решений.

3. Конструкция математических моделей экономики

Имеющиеся модели экономики можно разделить на три группы: эконометрические, "теоретические" и структурные. При эконометрическом подходе исходным пунктом служат статистические данные и внимание в первую очередь уделяют эмпирически устойчивым корреляциям отдельных показателей и только во вторую очередь - попыткам объяснить эти корреляции. При "теоретическом" подходе исходным пунктом служат абстрактные категории и связи между ними, постулируемые той или иной экономической теорией. Следует иметь в виду, что эти категории ("стоимость", "совокупный спрос", "сумма благ", "общее равновесие" и т.п.) часто имеют весьма опосредованное отношение как к наблюдаемым экономической статистикой величинам, так и к реальным действиям экономических субъектов. Наконец, структурный подход исходит из наблюдаемых или предполагаемых интересов и взаимоотношений экономических субъектов.

Подходы эти редко реализуются в чистом виде, но как тенденция, точка зрения авторов модели проявляются вполне отчетливо. Все они имеют очевидные недостатки и на практике сосуществуют и взаимодействуют, так что выбор одного из этих подходов по существу дело вкуса. Нам дороже всего объяснительная сила модели, поэтому наши модели относятся к структурному типу ("agent based" в международном научном жаргоне). Этот тип наиболее близок по духу исследованию операций, и только о структурных моделях дальше будет идти речь.

3.1. Агенты и активы

Чтобы построить структурную модель, мы должны выделить представляющиеся нам самыми важными в рассматриваемой экономической

систем роли и описать действия исполняющих эти роли субъектов. Однако, например, важнейшую роль потребителя исполняют сотни миллионов разных людей. Даже менее распространенную роль банкира в отдельном регионе исполняют несколько десятков банков, придерживающихся индивидуальных правил поведения. Не может быть и речи о возможности описывать индивидуальных субъектов для сколь-нибудь массовых ролей⁴. Поэтому мы вынуждены типизировать субъектов и уповать на то, что макроэкономические закономерности допускают индивидуальные вариации поведения в определенных рамках и реализуются независимо от этих вариаций. Так мы приходим к понятию экономического агента - типичного исполнителя данной роли, преследующего естественные для этой роли интересы и руководствующегося строго определенной агрегированной информацией о состоянии окружающей экономической среды.

Теперь надо выбрать язык величин, на котором можно количественно выразить интересы, возможности и информированность выбранных агентов, а также описать их взаимодействие. К этим величинам относятся прежде всего активы, которыми оперирует агент (агрегированные показатели объемов продуктов, услуг, ресурсов, финансовых обязательств и т.п.), а также сигналы о состоянии экономики, которые он получает (индексы цен, курсы проценты, директивные планы и т.п.).

3.2. Взаимодействия агентов

В описании взаимодействия агентов в моделях экономики почему-то проявляется значительно меньше разнообразия, чем в выборе набора агентов и языка величин. Во всех известных мне случаях применяется (хотя явно, как правило, не оговаривается) следующая схема. Для каждого агента ставится "локальная" экстремальная задача, функционал которой выражает интересы агента, а ограничения описывают, во-первых, технологические возможности агента и, во-вторых, "правила игры" или "положение агента в системе". Например, участник конкурентного рынка может, по определению, рассчитывать купить сколько угодно продукта, если он готов платить за него по известной цене. С точки зрения исследования операций это - ограничения информированности.

Поскольку итог взаимодействия зависит, вообще говоря, от всех

⁴На языке теории игр это наверно следовало бы назвать игрой неопределенно большого и переменного числа лиц.

его участников, результат решения локальной задачи агента - всего лишь "план", "сообщение", "функция спроса-предложения" этого агента. Планы взаимодействующих агентов подлежат согласованию. Для этого используется либо решение некооперативной игры (схема Нэша-Курно, олигополия), либо решение игры с правом первого хода (схема Гермейера-Штакельберга, монополия), либо схема конкурентного равновесия. Первая схема используется довольно редко, вторая - чаще, но наиболее типична для экономических моделей - третья.

Концепция конкурентного равновесия является, пожалуй, единственным оригинальным вкладом математической экономики в общую научную копилку абстрактных универсальных модельных конструкций, подобных экстремальной задаче, дифференциальному уравнению, марковскому процессу, решениям игр. Конкурентное равновесие не сводится ни к одной из схем решения игры, поскольку согласование планов агентов в нем достигается изменением цен, которыми ни один агент не распоряжается. Цены устанавливаются "невидимой рукой рынка" так, чтобы выровнять зависящие от них спрос и предложение. Внутренняя красота концепции конкурентного равновесия, его хорошие математические свойства, разнообразие конкретных интерпретаций и солидные эмпирические подтверждения его реальности заставляют снова и снова использовать эту конструкцию в моделях. Однако, каждый раз остается внутренняя неудовлетворенность от обращения к "невидимой руке". Очень хотелось бы описать процесс установления равновесия как обмен сообщениями участников рынка, но пока в сколь-нибудь общем случае это не удается.

3.3. Проблема агрегирования

Описав в принципе взаимодействия агентов, мы сталкиваемся со следующей проблемой: агентов, пусть и однотипных, у нас много, а ансамбль взаимодействующих агентов, вообще говоря, ведет себя не так, как один агент, а состояния и действия ансамбля описываются не теми величинами, что действия и состояния отдельных агентов. Возникает очень сложная и с содержательной, и с математической точки зрения проблема агрегирования описаний экономических процессов [1,4]. К сожалению, корректно решить ее удастся довольно редко, в основном, когда взаимодействие агентов описано по схеме конкурентного равновесия [4].

По этой причине в большинстве случаев мы вынуждены довольствоваться лишь интерпретируемостью макроописаний, используемых

в модели - утверждением, что эти соотношения могут быть порождены определенными целенаправленными действиями определенных агентов. Поэтому, услышав от автора модели слова вроде "банк назначает процент по депозитам, так чтобы ...", не спешите сравнивать величину процента в модели с величиной, написанной в вашей сберкнижке. Скорее всего в модели в качестве банка рассматривается вся банковская система, а процент - это эффективный результирующий процент по всем видам вкладов с учетом всех сбоев в договорах. Тем не менее интерпретируемость соотношений модели дает, как и в логике, определенную гарантию непротиворечивости, а также структурирует сделанные предположения: можно по отдельности изменять предположения об интересах, о технологиях и об информированности⁵.

3.4. Модели и системы моделей

Вернемся снова к выбору языка описания состояния и взаимодействия экономических агентов и содержанию используемых в модели величин. Этот выбор в значительной степени определяет структуру модели, а зависит он от многих обстоятельств.

Во-первых, конечно, набор переменных отражает специфику рассматриваемой экономики. Например, в рыночной экономике обычно важен не объем производства, а чистый продукт (разница между стоимостью выпуска и затрат), поскольку именно он определяет финансовый итог деятельности производителя. Для плановой экономики, напротив, важен абсолютный объем выпуска (валовый продукт в понимании советской статистики), поскольку именно он определяет фонд ресурсов, которым располагает распределяющий их центр.

Во-вторых, на выбор величин влияют интересующие исследователя проблемы: экологические, социальные, политические и пр. аспекты; географический (мировой, национальный, региональный) и временной (месяцы, годы, десятилетия) масштабы изучаемой системы.

В-третьих, существенны априорные представления о механизмах экономических процессов. Исследователь, считающий, что ключевые решения принимаются в финансовой сфере, выбирает и интерпретирует описания не так, как исследователь, полагающий, что деньги лишь оформляют реальные отношения продуктообмена.

⁵Современный компьютер позволяет провести численные эксперименты с действительно большим числом агентов, заставляя их некоторым образом адаптироваться друг к другу. Однако, так пока удастся построить лишь очень схематичные модели, и, кроме того, если выявляется нечто нетривиальное [5], надо строить модель модели, чтобы понять чему мы обязаны этим явлением.

В-четвертых, для проверки и использования модели необходимо, чтобы ее переменные были сопоставимы со статистическими данными, собираемыми в совершенно других целях и в другой системе понятий.

В результате в каждой модели слова "продукт", "цена", "деньги" и т.д. приобретают разный смысл. Поэтому, в частности, хорошую модель нельзя собрать как из кубиков не только из разработок разных исследователей, но и из своих собственных старых заготовок. Более того, сами основные конкурирующие экономические доктрины (неоклассическая-монетаристская, кейнсианская, марксистская, институционалистская) по той же причине не представляют собой логически последовательных построений. Употребляемые в них понятия используются в разных местах в разном смысле. Именно поэтому мы не имеем, как можно было бы ожидать, одной основной математической модели для каждой доктрины. Вместо этого есть десятки и сотни неоклассических, кейнсианских и пр. моделей с неясными границами применимости. Для сравнения напомним, что Максвелл изложил свою теорию электричества в огромном полусловесном труде, но Г.Герц и О.Хэвисайд быстро вычленили из него основные уравнения, и с тех пор мы имеем одну основную модель электродинамики, а все остальные являются ее более или менее корректными частными случаями. Представьте себе, что вместо этого мы, как в экономике, имели бы полсотни "максвелловских" и полсотни, скажем, "амперовских" моделей, использующих несопоставимые величины.

Впрочем, нет худа без добра. Поскольку хорошие модели "живут своей жизнью", отчасти независимой от конкретной интерпретации исходных гипотез, иногда обнаруживается, что выводы конкурирующих доктрин можно получить как частные случаи одной модели. Такой пример приведен в [1].

Представляется, что метафоричность экономических понятий, борьба с которой безуспешно идет уже более ста лет, имеет более глубокие причины, чем простое нежелание исследователей придерживаться более строгой методики в своей работе. Следует признать, что позитивная наука столкнулась с принципиальными трудностями при попытке изучить сложные саморазвивающиеся неэргодичные системы, такие как вселенная, биосфера, живой организм, человек, язык. Экономика была лишь исторически первой областью, где проявились эти трудности.

Опыт не дает оснований надеяться, что когда-нибудь будет построена общая "супермодель" экономики, к которой все "правильные" модели будут восходить как частные случаи. Каждая новая модель - это

целостный взгляд на целостную систему, подчеркивающий одни аспекты и игнорирующий другие. Экономические категории - это морфизмы, ассоциации, указывающие сходство и взаимосвязь различных моделей. Нужно учиться работать в такой ситуации. В настоящее время мы пытаемся реализовать указанное представление о связи моделей в системе поддержки математического моделирования экономики ЭКОМОД [6].

4. Модель экономики России 1992-1995гг.

После перечисления все возникающих при построении модели проблем у читателя вероятно возникнут законные сомнения в самой возможности сколь-нибудь надежно моделировать экономику. Надо, однако, заметить что в течение последнего столетия несмотря на все хорошо известные специалистам трудности и несмотря на сильное сопротивление экономистов описательного направления, математические модели постепенно стали основным, общепринятым языком обсуждения экономических проблем и широко используются во всем мире для помощи в принятии решений как на государственном уровне, так и на уровне отдельных фирм.

Что могут и чего не могут математические модели экономики мне легче всего проиллюстрировать на примере построенной нашей группой в 1993г. модели экономики России. Описание модели и полученных с ее помощью результатов будет здесь по необходимости кратким. Подробно они представлены в [1].

4.1. Структура модели

В модели мы выделили 6 агентов: производителей, население, импортеров, экспортеров, банки и государство (включая Центральный Банк). Взаимодействие агентов пришлось описывать как пирамиду монополий: Самыми слабыми участниками являются население и государство⁶, их доминируют импортеры и производители. Над ними, в свою очередь стоят коммерческие банки и Центральный Банк и выше всех в иерархии доминирования на рынке находятся экспортеры⁷. Между собой производители играют в своеобразную кооперативную игру,

⁶как потребитель. Государство имеет административные рычаги воздействия на экономику (налог, тарифы), но в рыночном торге, оно безусловно слабый участник в силу объективно слабой заинтересованности представляющих государство чиновников в экономии бюджетных средств

⁷Оказалось, впрочем, что в игре экспортеров и банков существует равновесие в доминирующих стратегиях, так что интересы этих агентов по существу не противоречивы, и они должны образовывать мощную коалицию, доминирующую над всей остальной системой

которую можно описать как конкурентное равновесие с тремя системами цен. Столь экзотичная конструкция понадобилась, чтобы объяснить сосуществование обычных денег и "самодельных" денег - неплатежей.

Все агенты в модели принимают решения по принципу "скользящего планирования": их функционалы полезности зависят не только на текущего, но и от будущего состояния, которое они прогнозируют, исходя из текущих цен и ожидаемого их изменения "инфляционных ожиданий". Требование соответствия ожиданий агентов фактическому изменению цен, происходящему в результате действий агентов, есть особое, независимое соотношение замыкающее модель. Такой способ описания взаимодействия рациональных субъектов общепринят в современной экономике и носит название "теории рациональных ожиданий" [7].

4.2. Некоторые результаты

Получившаяся модель содержит порядка десяти нелинейных дифференциальных уравнений и несколько десятков неразрешенных конечных связей, замыкающих дифференциальные уравнения. Модель была исследована как численными методами, так и аналитически (в различных упрощенных вариантах).

Прежде всего исследование показало, что модель системно согласованным образом описывает в совокупности основные качественные особенности развития экономики России в первые годы после реформы, а именно:

1. Практически полное отсутствие производственных инвестиций.
2. Высокий темп инфляции (около 20% в месяц).
3. Отрицательный реальный процент за кредит. Номинальный процент за коммерческий кредит (около 250% в год) был намного ниже темпа инфляции (около 800% в год).
4. Глубокий спад производства во всех, в том числе экспортных отраслях.
5. Взаимные неплатежи предприятий.

Аналитическое исследование [7] показало, что модель описывает особый тип экономического равновесия - инфляционное равновесие, которое, в отличие от классического является неэффективным - не оптимально загружает производство. Оказалось, что инфляционное равновесие может поддерживаться и без влияния государства и внешнего

рынка одними только вполне рациональными действиями банков, производителей и населения. Интересно, что это равновесие характеризуется отрицательным реальным процентом (процентом меньшим темпа инфляции). Надо заметить, что это явление реально наблюдавшееся в России сильно озадачивало экономистов.

В инфляционном равновесии всплеск инфляции может, вопреки мнениям монетаристов, породиться не только избытком, но и недостатком кредитной эмиссии. Это явление, которое называется дефляционным шоком и которое по утверждению многих экономистов (в частности Г.А.Явлинского) имело место весной 1992 и весной 1993г., также описывается нашей моделью.

Таким образом, первое, что может дать удачная модель - это более глубокое содержательное понимание происходящих экономических явлений и развитие экономической теории.

Численное исследование модели показало, что модель (после тщательной и весьма трудоемкой настройки) вполне удовлетворительно описывает количественную динамику основных макроэкономических показателей (уровней выпуска, темпов инфляции, потребления, денежной массы и т.п.). Особенно впечатляющим оказался следующий результат: после настройки проведенной в мае 1993г. модель до сентября предсказывала изменение курса доллара с точностью ± 10 руб. (см. [1]. Напомним, что в этот период еще не существовало валютного коридора.)

Таким образом структурная модель способна давать и количественный прогноз развития экономики до тех пор, пока не изменятся общественные отношения отраженные в соотношениях модели.

Наконец, может быть самое интересное, что можно получить из модели - это анализ последствий реальных или ожидаемых мероприятий правительства или внешних воздействий на экономику. Мы исследовали влияние возможных налоговых реформ, массовых забастовок, Чеченской войны [1].

Наиболее поучительными мне кажутся результаты исследований событий "черного вторника". Напомню, что 11 сентября 1994г. курс доллара на московской бирже подскочил с 2500 руб/долл. до 5000 руб/долл., а на следующий день упал до 3000 руб/долл. Предсказать такого рода события модель, конечно, не может, поскольку это целенаправленная государственная акция. Однако, имея модель, мы смогли сравнить фактическое развитие событий с тем, которое было бы, если бы этой операции не было. Поражает точность выбора момента операции: согласно модели именно на этот день приходился пик инфляции и

перелом естественной тенденции роста курса доллара⁸.

Модель позволила также проследить истинные последствия этой операции. На поверхности она выглядит просто: ЦБ продал доллары банкам по 5000 руб., а на следующий день скупил их по 3000руб. забрав у банков в бюджет около 160 млн. долларов. Однако, модель показала, что банковская система в целом сумела переложить убытки на своих клиентов, так что в конечном счете бюджет выиграл около 30 млн. долларов, остальной выигрыш достался экспортерам, а в убытке остались импортеры и население.

Таким образом, несмотря на все указанные выше трудные проблемы моделирования, иногда удается построить реалистичные модели экономики, дающие как прогностической, так и объяснительной силой. Чего мы не можем, так это предсказать изменения общественных отношений, в результате которых модель становится непригодной. В частности, модель о которой шла речь перестала соответствовать ситуации в экономике России в 1995г.

5. Литература

1. А.А. Петров, И.Г. Поспелов, А.А.Шананин. Опыт математического моделирования экономики. М. Энергоатомиздат, 1996, 558с.

2. И.Г. Поспелов. Динамическая модель поведения контрагентов на рынке. // Экономика и математические методы. т. XXIV, N3, 1988, С.497-508.

3. И.Г. Поспелов, Л.Я. Поспелова ИНДЕКС - система исчисления агрегированных показателей потребительского спроса. Сообщения по прикладной математике, М.: ВЦ РАН, 1995, 36с.

4. А.А. Петров, А.А. Шананин. Системный анализ экономики: проблема агрегирования описания экономических отношений. //Математическое моделирование: Методы описания и исследования сложных систем, под ред. А.А.Самарского, Н.Н.Моисеева, А.А.Петрова. М.: Наука, 1989, С.121-157.

5. С.М. Гуриев, И.Г. Поспелов, М.Б. Шахова. Математическая модель самоорганизации торговых сетей // Сообщения по прикладной математике.: М. Вычислительный Центр РАН, 1996, 47с.

⁸Осуществил операцию (не по собственной, разумеется, инициативе) тогдашний председатель ЦБ С.В.Геращенко. В процессе работы над моделью мы не раз убеждались в высочайшей квалификации этого финансиста, в исключительной выверенности и эффективности проводившихся им акций (например, взаимозачета платежей в августе 1992г.)

6. А.А. Петров, И.Г. Пospelов, Л.Я. Пospelова. Система интеллектуальной компьютерной поддержки математического моделирования экономики - ЭКОМОД, М. Вычислительный центр РАН, 1996, 79с.

7. С.М. Гуриев, И.Г. Пospelов. Модель общего равновесия в экономике переходного периода // Матем. моделирование. Т.6, N.2, 1994. С.25-37.

1. В настоящее время сетевые территориально распределенные системы занимают важное место в экономике. Бесперебойная и ритмичная работа транспорта, топливно-энергетического комплекса, сетей связи и управления во многом определяет нормальное функционирование всей промышленности. Стабилизация и совершенствование экономики страны требуют развития и модернизации соответствующих сетевых инфраструктур. При анализе существующих и проектировании перспективных сетевых систем приходится учитывать большое число факторов, а динамическая изменчивость и неопределенность в задании различных параметров ставят перед исследователем сложные задачи, помощь в решении которых может оказать исследование операций [1,2].

Сеть передачи многопродуктового потока или, иначе говоря, многопродуктовая сеть (МП-сеть) является математическим объектом, который традиционно служит моделью для различных сетевых систем. В общем случае моделируемая система характеризуется территориально распределенной структурой, описываемой с помощью взвешенного графа с заданными пропускными способностями ребер. Предполагается, что в графе имеется выделенное подмножество упорядоченных пар вершин (тяготеющих пар), соответствующих источнику и стоку некоторого продукта. При передаче продукта по сети от его источника к стоку говорят о потоке продукта данного вида. В многопродуктовой сети считается, что все потоки проходят по сети одновременно.

Основы потокового программирования (ПП) были заложены в 50-х годах Фордом и Фалкерсоном [2]. ПП считается одним из краеугольных камней исследования операций. Концептуальная и математическая четкость построений, эффективные методы решения задач большой размерности привели к широкому использованию моделей однопродуктовых сетей в исследовании операций. В те годы были поставлены и решены такие, ставшие уже классическими, задачи анализа сети, как задачи о максимальном потоке и потоке минимальной стоимости.

Задачи о передаче многопродуктового потока в сетях начали изучать в те же годы, однако успехи в их решении были скромнее и в основном связаны с развитием методов линейного программирования. Очевидно, что модель МП-сети точнее описывает сложные сетевые системы, может служить основой для развития более тонких методов

их анализа, а появление мощных ЭВМ дает возможность разработки и совершенствования алгоритмов решения различных оптимизационных задач на МП-сетях.

Оптимизационной задачей, которая обычно ассоциируется у математиков с понятием МП-сети, является задача минимизации стоимости передачи по сети заданного мультипотока продуктов, или же задача максимизации взвешенной суммы потоков всех продуктов при ограничении суммы средств, выделенных на увеличение пропускной способности ребер сети. Такие постановки естественно возникают в задачах, допускающих чисто экономическую интерпретацию, но для многих других задач они не характерны. Тем не менее основное внимание исследователей МП-сетей уделяется именно этим постановкам, хотя теория и методология решения общих оптимизационных задач на МП-сетях разработана далеко не полностью. Понятия, вводимые по простой аналогии с однопродуктовыми сетями, не соответствуют специфике МП-сетей даже для указанной выше задачи максимизации суммарного потока, а конструкции, специально принятые для этой задачи, не учитывают всего многообразия прикладных проблем.

При анализе конкретной сетевой системы зачастую интерес представляет не столько оценка значения какого-либо скалярного функционала, в той или иной степени отражающего качество функционирования системы, сколько выявление ее характерных структурных особенностей, оценка вариантов, претендующих на оптимальность в реальных задачах большой размерности. Поэтому при математической постановке оптимизационных задач на сетях выбор целевого функционала должен учитывать не только его соответствие содержательным соображениям, но и возможность с его помощью охарактеризовать структурные свойства сети и алгоритмы управления потоками. Решения соответствующих оптимизационных задач должны позволять оценивать или формировать целый набор проектов сети с тем, чтобы обеспечить возможность выбора приемлемого варианта реальной сетевой системы.

2. Первоочередной шаг при анализе МП-сети – решение задачи о допустимости. В задаче о допустимости считается, что задана сеть с ограниченными пропускными способностями дуг и заданы величины потоков, которые следует передавать между выделенными парами вершин (узлов сети). Вопрос состоит в том, можно ли в данной сети одновременно пропустить заданные потоки. Если это невозможно, то возникает необходимость поиска компромиссного решения. В качестве компромиссного распределения потоков в МП-сети с заданными требованиями на передаваемые потоки предлагается максиминное

правило распределения потоков – при котором было бы максимальным отношение реализованного в сети потока к заданным требованиям для ”самых необеспеченных” пользователей (т.е. для пары пользователей, у которых указанное отношение минимально). Для анализа конкретной сетевой системы большой интерес представляет описание ”узких мест” сети. В МП-сети вводим понятие максиминного рассечения как множества дуг, сдерживающих увеличение потока.

Анализу реальной сетевой системы можно придать нормативный характер – заданные требования на величины передаваемых потоков рассматривать как некоторые нормативы, и поставить задачу: узнать, насколько полно они могут быть реализованы в данной сети. Если же требования трактовать как попытки реальных пользователей дозволиться, то можно говорить о конкуренции за ресурсы сети и, соответственно, о задаче конкурентного распределения потоков. Для нормативного (конкурентного) анализа сети предлагается следующая процедура: на первом шаге определить максиминный уровень выполнения нормативных требований (т.е. максимальный уровень, который удастся обеспечить сразу для всех тяготеющих пар), затем выделить пары, уровень обеспеченности (нормативов) которых не может быть улучшен без ущерба для других, найденные для них величины потоков фиксировать и далее определять подмножество пар с более высоким уровнем обеспеченности нормативных требований, фиксировать для них уровень и т.д. Соответствующий способ распределения потоков назван лексикографическим максиминным правилом. Решение возникающей последовательности лексикографических максиминных задач позволяет описать иерархию ”узких мест”, выделить тяготеющие пары различных уровней обеспеченности требований, определить значения этих уровней, т.е. получить набор содержательных характеристик качества функционирования МП-сети как системы ”обслуживания” заданного вектора требований (или N-ядро в задаче конкурентного распределения потоков).

Следует сказать, что для МП-сетей естественными являются многокритериальные постановки, так как они вытекают из условия одновременной передачи всех потоков и их невзаимозаменяемости. Действительно, частными критериями в задачах на МП-сетях могут выступать потоки всех видов продуктов без дополнительной априорной информации.

При постановке многокритериальной оптимизационной задачи на МП-сети в качестве решения рассматривается все множество Парето-оптимумов (ПО), т.е. значений, не улучшаемых ни по одному критерию

без ущерба для других в рамках конкретной сетевой задачи. В случае, когда выделена часть критериев (например, более "важные" пользователи), которые лексикографически упорядочены, под решением понимается множество ПО для оставшихся критериев (пользователей) при условии достижения лексикографического оптимума по выделенным критериям.

3. При анализе реальных сетевых систем нельзя обойти важный вопрос о способности системы удовлетворять заданным требованиям при наличии возмущений, не являющихся пренебрежимо малыми. В процессе функционирования системы могут возникать случайные помехи, сбои и отказы элементов, способные довольно сильно исказить характеристики больших фрагментов всей системы. Обычно стараются путем дублирования снизить влияние каждого элемента в отдельности на качество функционирования сетевой системы в целом. Соответствующие математические задачи находятся в ведении теории надежности, где традиционно предполагается, что вероятность одновременного возникновения большого числа отказов достаточно мала, т.е. игнорируется характерный для отказов в сетевых системах каскадный эффект. Кроме того, многозвенную территориально распределенную сетевую систему невозможно гарантировать от произвольных, неслучайных и даже целенаправленных помех расчетному функционированию. Необходимость априорной оценки возможных последствий подобных возмущений приводит к проблеме анализа уязвимости сетевой системы — одной из характерных задач исследования операций.

Задачи понижения уязвимости наряду с задачами повышения надежности сетей зачастую формулируются как оптимизационные, обыкновенно, по стоимости, но в данном случае оптимальность системы должна быть вторичной по отношению к основной задаче обеспечения гарантий (пусть не наилучшего, а приемлемого) функционирования сетевой системы. Такая концепция гарантированности определенного уровня функционирования, в частности, предполагает, что если воздействия не известны заранее или неточно известны, например когда задана лишь мощность, но не место удара, то следует рассчитывать на наихудший возможный вариант или сразу на несколько различных вариантов. Тем не менее, в отличие от так называемого "пессимистического" подхода, вся имеющаяся информация и вся ожидаемая информация безусловно используется. Так, при постановке задачи апостериорного управления потоками считается, что размеры и локализация воздействия станут известными к моменту перераспределения потоков.

В реальных условиях даже сам выбор критерия оценки уязвимо-

сти представляет определенную трудность, поскольку территориально распределенные сетевые системы предназначены для обслуживания и передачи большого числа различных внешних по отношению к системе заявок и потоков. Под анализом уязвимости сетевой системы будем понимать построение отображения, которое связывает изменение функциональных (выходных) характеристик системы с ухудшением показателей работоспособности ее элементов.

Стандартная методология при анализе уязвимости сетевых систем ориентирована либо на комбинаторно-графовый подход, либо на методы теории вероятностей. В рамках теории графов обычно изучают структурные свойства сетей. Хотя такие характеристики как диаметр, связность и медиана хорошо описывают структурные особенности графа сети, однако использование их в качестве меры уязвимости потоковой сетевой системы требует серьезного методологического обоснования, прослеживания взаимосвязей функциональных и топологических характеристик сетевой системы. С другой стороны, при анализе уязвимости сетевых систем возникает проблема неопределенности, вернее, незнания характеристик будущих возможных воздействий. Последнее обстоятельство приводит к многочисленным попыткам применения аппарата теории вероятностей для оценки неизвестных заранее разрушений. Очевидно, что при анализе уязвимости сети умышленные повреждения, целенаправленные разрушающие воздействия нельзя рассматривать как многократно повторяющееся событие, поэтому трудно говорить о "вероятности" таких событий в общепринятом математическом смысле. Например, используются плотности распределения для описания неопределенности в представлениях исследователя как о месте приложения целенаправленного воздействия, так и о степени разрушений. Коль скоро такие попытки все же предпринимаются, то следует весьма осторожно относиться к содержательным выводам, сделанным на основе вероятностного подхода.

В отличие от указанных двух подходов целесообразнее использовать методологию исследования операций. С позиций теории исследования операций рассмотрим проблему оценки уязвимости МП-сети, когда конкретные данные о воздействии отсутствуют, а предположительно известно лишь множество возможных воздействий. Проблема анализа уязвимости исходной МП-сети тогда формулируется как задача получения параметрической зависимости передаваемого МП-потока от потерь суммарной пропускной способности ребер сети, где параметром является коэффициент потерь. Разрабатываются способы построения требуемой зависимости.

4. Сегодня повсеместно наблюдается общий и постоянный рост требований на услуги связи и транспорта, доставку топлива и энергоресурсов. Количественные и качественные изменения требований порождают серьезные технико-экономические проблемы, для решения которых необходимо проводить модернизацию и преобразование физических объектов, образующих соответствующие сетевые подсистемы. В частности, в сетях связи происходит расширение перечня услуг, возникают новые способы передачи, что в свою очередь порождает возрастание требований и информационных потоков.

Многие исследователи считают, что недостаточное развитие систем обмена информацией может служить тормозом экономического роста, и обращают внимание на корреляцию между уровнями развития экономики и связи. В высокоразвитых странах большое внимание уделяется разработке долгосрочных планов развития сетей связи. При этом возникает проблема выбора пути, который приведет к желаемым результатам и разумным системам в этом мире быстро растущих и меняющихся требований, новейших технологий и усложнившихся информационных структур.

В исследовании операций давно изучаются модели анализа проектов развития и модернизации сложных систем. Расчеты на модели помогают проектировщику будущей сети найти ответы на следующие вопросы:

- в какие моменты времени, в какие узлы сети и в каком количестве устанавливать новое оборудование;
- между какими узлами сети и в каком количестве необходимы каналы связи в каждый момент времени;
- какая часть поступающих информационных потоков будет пропущена по сети при заданных стандартах качества обслуживания.

Чисто формально расчеты на модели можно рассматривать, как решение задачи синтеза МП-сети. На базе теории исследования операций сформулирована обобщенная задача нормативного анализа МП-сети, в которой предполагается, что вектор требований может быть описан с точностью до принадлежности некоторому множеству, в общем случае изменяющемуся во времени.

В целом в рамках методологии исследования операций в ВЦ РАН разрабатывается математическая теория и методы исследования широкого класса сложных систем, допускающих приближенное описание с помощью модели многопродуктовой сети. Модель МП-сети достаточно точно описывает взаимосвязь основных параметров сети, а предлагаемые новые постановки задач позволяют по-новому взглянуть на неко-

торые сетевые проблемы. Следует отдельно рассматривать системы, предназначенные для обслуживания многих пользователей в условиях ограниченного общего ресурса. Для таких систем необходимо исследовать математическую модель формирования критериев, дифференцированно характеризующих общее качество обслуживания. При этом вводится гипотеза о невзаимозаменяемости и равноправности пользователей при обслуживании их заявок – требований. Подобные системы могут иметь самую разную физическую природу. В качестве примера приведем список из книги [3] (стр.441): ”перевозка груза между городами, осуществляемая автомобильным, железнодорожным, воздушным и водным транспортом; проектирование коммуникационной сети с несколькими центрами связи и несколькими линиями передачи информации; распределение почты, включая письма и посылки, между несколькими почтовыми отделениями; управление производственным процессом и запасами при непрерывном предложении и спросе; проектирование системы сбора, переработки и ликвидации твердых отходов; проектирование городской транспортной сети, и т.д.”.

Литература

1. Малащенко Ю.Е. Математические модели анализа потоковых сетевых систем. М.: ВЦ РАН, 1993.
2. Форд Л., Фалкерсон Д. Потоки в сетях. М.: Мир, 1966.
3. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей. М.: Мир, 1984.

Метод имитационных игр в проблемах геополитики, безопасности, межгосударственных отношений

Ю.Н. Павловский⁹

В статье описывается выполняемый в Вычислительном центре РАН цикл исследований, связанный с организацией и проведением имитационных игр, ориентированных на исследование проблем геополитики, безопасности, межгосударственных отношений.

1. О методе имитации и имитационных игр.

Данный раздел статьи является вводным. В нем некоторые понятия и словосочетания, в частности, "имитация", "имитационная игра", "сложный управляемый процесс" наделяются более конкретным содержанием, чем общепринятое. Введенные конкретизации используются для компактной характеристики выполняемого в ВЦ РАН цикла исследований.

Употребляемое далее понятие "сложный управляемый процесс" означает, что существующими средствами и методами управление процессом, о котором идет речь, не может быть автоматизировано в достаточно полной мере и при управлении этим процессом существенна роль людей (практиков – управленцев, экспертов, операторов, менеджеров и т.д.), организованных, вообще говоря, в некоторую управляющую структуру, элементы которой трактуются как органы управления. Будет считаться, что в органах управления реализуется "процесс принятия решений". Метод имитации и имитационных игр при изучении сложного управляемого процесса состоит в таком его модельном воспроизведении, при котором процесс принятия решений воспроизводится "как можно более натурно". Это означает, что действия управляющих органов, принимаемые ими решения, воспроизводит специальная группа экспертов, олицетворяющих эти органы. Это означает также, что модельному воспроизведению на некотором уровне подвергается информационный процесс – процесс сбора, обработки, хранения, передачи информации, поскольку принимаемые органами управления решения существенно зависят от располагаемой ими информации и никакого адекватного воспроизведения процесса принятия решений не может быть, если информационный процесс воспроизводится неверно. Если интересы различных органов управления, могущих влиять

⁹© Ю.Н. Павловский

на изучаемый процесс не являются тождественными, то воспроизведение процесса называется имитационной игрой, в противном случае – просто имитацией.

Использованное здесь словосочетание ”модельное воспроизведение” – это не обязательно воспроизведение течения процесса с помощью математических моделей. Характеристики процесса, описывающие его течение, воспроизводятся либо с помощью математического моделирования, если есть уверенность в том, что математическое моделирование действительно дает их адекватный прогноз в зависимости от принятых решений, либо с помощью оценок, которые даются другой специальной группой экспертов, называемых обычно ”посредниками”. Может быть и такая ситуация, когда некоторые стороны процесса подвергаются математическому моделированию, а некоторые – оцениванию с помощью посредников. В последнем случае принято говорить, что имитация сложного процесса или имитационная игра ”поддерживается” некоторыми моделями.

Соотношение между математическим моделированием и оцениванием с помощью посредников при воспроизведении объективных характеристик процесса зависит от самого процесса и может быть самым разным. Здесь одна крайность – это ”чистая” имитация или ”чистые” имитационные игры, где оценивание с помощью посредников объективных характеристик не используется и эти характеристики рассчитываются с помощью соответствующих моделей. Другая крайность – это экспертное воспроизведение объективных характеристик процесса. Имитационные игры в этом случае будут называться ”организационно-деятельностными”. В таких играх, наоборот, не используются математические модели. Далее термин ”смешанная” будет использоваться для имитационных игр, где для воспроизведения объективных характеристик процесса применяется как математическое моделирование, так и оценки посредников.

Метод имитации и имитационных игр, так как он здесь понимается, широко используется в различных областях исследований, обучения и практической деятельности. По-видимому, его первые применения – это командно-штабные игры, существующие в практике изучения вооруженной борьбы и обучения управления ею с середины прошлого века. Командно-штабные игры вплоть до начала шестидесятых годов были чисто организационно-деятельностными. В настоящее время в этой сфере используются все виды имитационных игр, а расходы на разработку соответствующих моделей, организацию и проведение игр в развитых странах становятся все более заметной долей в общих расхо-

дах на оборону и имеется тенденция очень быстрого увеличения этой доли. Яркими примерами использования метода имитации и имитационных игр являются тренажеры в авиационной и аэро-космической индустрии, разработка систем безопасности АЭС и обучение операторов АЭС. Под названием "деловые игры" метод имитации и имитационных игр используется при изучении социально-экономических процессов различных уровней. Деловые игры – это, как правило, организационно-деятельностные игры.

В методе имитации и имитационных игр весьма существенную роль играет то, что принято называть "сценарием". Это – сложное понятие, понимаемое по-разному различными специалистами, связанными с методом имитации и имитационных игр. Прикладные математики, связанные с имитацией и имитационными играми, называют сценарием имитации или имитационной игры совокупность величин, описывающих начальное состояние моделируемого процесса, совокупность правил и ограничений, которым должны подчиняться действия экспертов, воспроизводящих процесс принятия решений в моделируемой системе. Кроме того в сценарий в этом понимании входит цель, которая ставится при изучении процесса методом имитации или имитационных игр.

Понятием "сценарий" пользуются также специалисты гуманитарного профиля, политологи, никак не связанные с методом имитации и имитационных игр. Здесь понятие "сценарий" носит, естественно, более расплывчатый характер. Оно означает общее описание предполагаемого варианта развития некоторого сложного социально-экономического процесса, выделение его узловых моментов. Две отмеченные трактовки понятия "сценарий" имеют много общего.

2. О развитии метода имитации и имитационных игр в Вычислительном центре РАН. Технология отладки и отработки сценариев.

Первая имитационная игра в ВЦ РАН была выполнена в 1968–1969 гг. Ее инициаторами была группа специалистов ВЦ РАН (Евтушенко Ю.Г., Краснощеков П.С., Павловский Ю.Н., Петров А.А.). Непосредственной причиной ее организации и проведения были отрицательные эмоции, которые вызывали существовавшие в то время модели социально-экономических процессов. Конец шестидесятых и начало семидесятых годов характеризовались интенсивным развитием в СССР экономико-математических методов и иллюзиями у многих исследователей, что на их базе можно коренным образом улучшить эффективность социально-экономической системы, имевшей ме-

сто в СССР. Подавляющее большинство математиков, функционировавших в этой сфере, не были тесно связаны с профессиональными практиками-управленцами. Реальные задачи управления в существовавшей в СССР социально-экономической системе они втискивали в прокрустово ложе оптимизационных и теоретико-игровых схем, а безуспешные попытки внедрить что-либо в практику принятия решений относили к косности практиков-управленцев. Ощущение существования разрыва между сферой изучения задач управления в социально-экономических системах формальными методами и практикой реального управления побудил указанную группу исследователей обратиться к имитационной игре. (Возможно, автор неточно описывает мотивы, в силу которых действовали другие инициаторы игры.) Была сделана попытка разработать модель какого-либо социально-экономического процесса, с одной стороны, достаточно сложную, чтобы в ней остались некоторые черты реальной управленческой проблемы, с другой стороны, достаточно простую, чтобы ее можно было реализовать существовавшими тогда средствами.

Достаточно случайно в качестве объекта моделирования была выбрана система из трех государств. Была построена математическая модель экономического и военного функционирования государств. Они располагали территорией, разделенной на регионы. Регионы характеризовались количеством расположенных в них мирных и военных фондов и вооружений. Мирные фонды производили мирную продукцию, военные фонды производили вооружения, обычные и ядерные. Количество производимой продукции характеризовалось фондоотдачей, своей для каждого региона. Фонды могли быть расположены не только на территории своей страны, но и на территории других стран. Полученную мирную продукцию каждая страна делила на потребление и инвестиции. Инвестиции, в свою очередь, распределялись на вложения в мирный и военный сектора экономики. Изменение фондов определялось сделанными инвестициями и естественной амортизацией. Страны могли обмениваться мирной и военной продукцией, вступать в союзы, заключать договора военного и экономического характера, воевать, как с применением обычного, так и ядерного оружия. Результаты боевых действий, если они происходили, воспроизводились с помощью простейших вариантов моделей вооруженной борьбы с учетом психологических факторов [1,2]. Каждая страна, располагавшая ядерным оружием, заранее составляла план его использования, указывающий количества средств, нацеленных по различным регионам. Все, находившееся в регионе, если ядерные средства его достигали, терпе-

ло урон в соответствии с заданными коэффициентами, характеризующими эффективность ядерного оружия. Страны могли вкладывать средства в систему ПРО, уменьшавшую количество ядерного оружия, достигавшее страну.

Кратко опишем элементы сценария и некоторые фрагменты выполненной в то время имитационной игры. Подробности см. в [3]. В игре участвовало три государства. Самое развитое из них (далее оно будет именоваться страной Г), как в экономическом, так и в военном отношениях имело небольшую территорию и высокую концентрацию мирных и военных фондов на ней. Государство, которое далее будет именоваться страной К, занимало в рассматриваемой системе промежуточное положение по экономическому развитию, а в военном отношении не уступало стране Г и имело большую территорию и малую концентрацию фондов. Государство, которое далее именуется страной В, было слабо развито как экономически, так и в военном отношении, но в нескольких его регионах, пограничных со страной К, имелись ценные природные ресурсы, что создавало существенно более высокую эффективность инвестиций в эти регионы, чем в любые другие регионы рассматриваемого "мира". У стран Г и К в начале игры имелось ядерное оружие, но его было немного – недостаточно, чтобы существенно уменьшить экономический и военный потенциал. К этому необходимо добавить, что по сценарию игры игроки имели очень неточную информацию об эффективности как ядерного оружия противника, так и своего собственного. Страна В не имела ядерного оружия и по сценарию игры не могла его самостоятельно производить. Страна Г имела довольно большие мирные фонды на территории страны В, сосредоточенные как раз в областях с ценными природными ресурсами рядом с границей страны К. По сценарию выигрывала та страна, которая в момент окончания игры добилась самого большого прироста мирного капитала на единицу первоначального, что, в сущности, соответствовало саму большому относительному приросту народного потребления. Момент окончания игры не был известен играющим. Начальные условия и параметры модели были подобраны так, что, если бы страны вели себя пассивно (не вели войн, не милитаризовывали экономику, не старались добиться преимуществ экономическими способами), то относительный прирост мирного капитала у них был бы примерно одинаков.

За каждую страну играла группа сотрудников Вычислительного центра РАН, являвшихся весьма квалифицированными специалистами в области методов оптимизации и теории игр. Выполненная игра была по введенной выше терминологии смешанной, поскольку информаци-

онный процесс воспроизводился посредниками, которыми были перечисленные выше организаторы игры. Отметим некоторые моменты, связанные с этой игрой, которые представляются интересными. Прежде всего, отметим, что, несмотря на относительную простоту использованных математических моделей, никто из играющих не нашел возможности использовать методы оптимизации и теории игр для принятия своих решений. В игре были три четко выраженных периода. Первый период можно охарактеризовать как период "вхождения в роли" руководителей стран и осознания своих интересов в образовавшейся системе. В этот период каждая страна вела себя осторожно, не принимала никаких "резких" решений, сохраняя ту ситуацию, которая была задана сценарием как начальная. Второй период можно охарактеризовать как образование в системе государств двух конфронтационных военно-политических блоков. Третий период – военный конфликт.

По моему мнению, наиболее интересным моментом в игре был механизм возникновения конфронтации и вооруженного конфликта в моделируемой системе. Это произошло следующим образом. Исходным моментом было стремление страны К "конвертировать" свою военную мощь в экономическое преимущество и проистекающее отсюда "резкое", "агрессивное" поведение во внешнеполитической области, стремление изгнать страну Г из пограничных с ней областей с ценными природными ресурсами и заменить страну Г своим присутствием в этих областях. Это было воспринято странами В и Г как подготовка к войне, хотя никаких конкретных планов на этот счет страна К не имела. Страны Г и В объединились в блок и произвели конверсию части мирных фондов в военные. Узнав об этом через некоторое время (по сценарию страны получали от посредников данные об экономическом и военном развитии друг друга с временной задержкой) страна К сочла, что к войне готовится блок В и Г, поскольку, произведя конверсию мирных фондов эти страны уже никак не могли выиграть, если иметь в виду сценарное условие выигрыша. Единственным выходом из создавшейся ситуации страна К сочла немедленное начало войны, так как через некоторое время военное преимущество блока В и Г неизбежно стало бы подавляющим.

Описанный фрагмент игры интересен тем, что "анатомирует" взаимоотношения стран, выявляет причины военного конфликта, произошедшего в имитируемом "мире", где каждый участник стремился увеличить благосостояние своего народа, где никто к войне намеренно не стремился и, тем не менее, она произошла. Ее причины состоят в авантюрном характере внешней политики, проводившейся одной из

стран, имеющей целью получить экономические преимущества, в стране, который вызвала эта политика, в неверной оценке каждой страной мотивов в силу которых действовали другие страны и целей, которые другие страны преследовали. По нашему мнению, механизм развития конфликта, который реализовался в процессе имитационной игры, фрагмент которой был описан, в настоящее время не исключен полностью из жизни мирового сообщества. Механизм развития Карибского кризиса содержал моменты, в некоторых аспектах перекликающиеся с описанным механизмом.

К сожалению, Главлит СССР запретил в то время публикацию результатов выполненного исследования, что, по нашему мнению, задержало развитие исследований проблем геополитики, безопасности, межгосударственных отношений методом имитационных игр. Запреты на публикации исчезли "естественным образом" в конце восьмидесятых годов [3] и исследования в этой области возродились. Вплоть до 1993 г. они поддерживались периодически как государственными, так и частными организациями. В рамках этих исследований разрабатывались различные варианты математических моделей экономического и военного функционирования государств, более подробные, чем те, которые лежали в основе первой игры, описанной выше, организовывались и проводились имитационные игры с разным составом участников. Коротко опишем характер, некоторые результаты и интересные моменты, связанные с проведенными имитационными играми.

Декларируемые цели исследований носили прикладной характер. Если суммировать цели, которые ставились в различных конкретных исследованиях, то получится следующий их список.

А) Разработка и накопление математических моделей разного уровня, описывающих экономическое и военное функционирование государств.

В) Разработка инструментальных средств имитационного моделирования, позволяющих хранить программы, реализующие различные модели, легко организовывать из них необходимые для различных имитационных экспериментов взаимосвязанные комплексы программ, поддерживать выполнение имитационных экспериментов, т.е. обрабатывать и визуализировать результаты, иметь диалоговый сетевой режим проведения имитационных экспериментов, хранить результаты выполненных имитационных экспериментов.

С) Разработка и накопление программ, реализующих различные модели в рамках инструментального комплекса имитационного моделирования, о котором шла речь в пункте В).

D) Разработка сценариев и проведение имитационных игр, преследующих конкретные цели.

E) Разработка программного обеспечения и сценариев имитационных игр, предназначенных для использования в учебном процессе на факультетах прикладной математики в рамках курсов по имитационному моделированию.

Вместе с перечисленными выше, вполне достижимыми целями прикладного характера преследовались также цели, наличие которых позволяют относить проведенные исследования к фундаментальным. Таковыми целями являлись разработка технологии анализа проблем геополитики и безопасности, прогноза развития межгосударственных отношений в мировом сообществе, объединяющей возможности гуманитарных и формальных средств анализа. В более общем плане – разработка методов прогнозирования сложных социально-экономических процессов, синтезирующих гуманитарные и математические методы. Элементом этой технологии является метод анализа и отработки сценариев [4]. Он состоит в "превращении" сценариев развития изучаемого процесса, которыми оперируют политологи (см. выше), в сценарии имитационных игр, организацию и проведение игр, уточнении на этой основе гуманитарных политологических сценариев, организации и проведении новых игр по этим сценариям и т.д. Обращение к имитационным играм в методе анализа и отработки сценариев может происходить не только со стороны профессионального политологического анализа, но и с "противоположной" стороны – как "развертывание" оптимизационных и теоретико-игровых схем в более подробные модели с целью уяснить в какой мере справедливы рекомендации, полученные на базе этих схем.

В качестве примера приведем результаты некоторых конкретных исследований в области проблем стратегической стабильности и национальной безопасности России, полученных с помощью элементов метода отладки и отработки сценариев. В этих исследованиях сценарии имитационных игр извлекались не из гуманитарных сценариев (см. ниже), а из исследования теоретико-игровых схем, посвященных вопросам существования устойчивых состояний в играх [5]. Анализ хода имитационных игр вместе с результатами исследования теоретико-игровых схем позволили сделать следующие выводы:

а) Традиционный подход к проблеме стратегической стабильности и национальной безопасности, восходящий к Макнамаре и основанный на понятии непремлимого ущерба, наносимого в ответном ядерном ударе страной, подвергшейся нападению с применением ядерного оружия,

в настоящее время становится все более недостаточным, что определяется следующими обстоятельствами:

- разрушением двухполюсной геополитической структуры;
- принципиальным недостатком понятия неприемлимого ущерба: учет экологических последствий ядерной войны говорит о том, что обезоруживающий первый ядерный удар принесет неприемлимый ущерб той стороне, которая его нанесла, даже если противная сторона никак на него не ответит;
- неучетом в обсуждаемом подходе экономических интересов стран в условия их мирного развития.

б) Наиболее адекватной трактовкой понятия "национальная безопасность" является ситуация, когда военная мощь и благосостояние народа данного государства превышают некоторые пороговые значения.

в) Если национальная безопасность всех государств в их системе обеспечена, то ситуация стратегической стабильности есть ситуация такого баланса экономических и военных интересов сторон, от которой им невыгодно отступать, если все остальные страны его придерживаются.

г) Уровень ядерных вооружений, обеспечивающий безопасность государств, ими владеющих, объективно существует.

д) Существенным фактором, обеспечивающим стабильность развития мирового сообщества является правильная оценка странами мотивов и целей, в соответствии с которыми действуют другие страны. Дестабилизирующим фактором является отсутствие у государств четко осознанных и объявленных целей, отсутствие приемственности при смене политического руководства, наличие у политических деятелей качества, именуемого "непредсказуемостью".

е) Существенным фактором в обеспечении стабильности является правильная оценка странами военной мощи как своей собственной, так и других стран, возможность адекватно прогнозировать развитие вооруженных конфликтов и их политических последствий.

ж) Чем меньше уровень конфронтационности, противоположности между интересами, целями стран, тем более высокий уровень информированности их о вооружениях друг друга им выгоден.

з) Точное знание странами уровней вооружения друг друга и их эффективности, а также способность адекватно прогнозировать развитие вооруженных конфликтов не только блокирует гонку вооружений, но и создает механизм гонки разоружения.

Привлечь к исследованиям в рамках метода анализа и отработки

сценариев сферу гуманитарного политологического анализа пока не удалось. Собственно говоря, такая задача и не ставилась. Таковое привлечение является трудной проблемой и требует разработки специальной технологии. На все рекомендации и выводы, полученные вне этой сферы, "не пропущенные" сквозь нее необходимо смотреть как на некоторые гипотезы. Средства формального анализа являются лишь инструментом, которым нужно учиться пользоваться совершенно также, как нужно учиться пользоваться любым другим инструментом в любой другой сфере деятельности. Неправильное использование любого инструмента в любой сфере деятельности приносит, естественно, не пользу, а вред, тем большую, чем мощнее инструмент. Без определенного уровня образованности и культуры во всех структурах, имеющих отношение к принятию решений в области геополитики и безопасности, использовать высокие технологии анализа и прогноза нельзя, да и невозможно. С другой стороны, консервативность сферы принятия государственных решений в области геополитики и безопасности естественна и необходима. Все выводы в области геополитики и безопасности, которые получаются с применением средств формального анализа, если они верны, должны быть понятны специалистам гуманитарного профиля. Если же их нельзя объяснить таким специалистам, то они неверны. Зачем тогда средства формального анализа нужны? Этот вопрос совершенно аналогичен вопросу – зачем нужны современные средства строительной индустрии, бессмысленность которого очевидна; еще раз хотим обратить внимание на то, что средства формального анализа и технология анализа и прогноза, объединяющая возможности формальных и гуманитарных методов, являются инструментами, использование которых может позволить глубже понимать то, что происходит, принимать более обоснованные и эффективные решения. Однако наибольшее значение (это относится к любой сфере деятельности) имеет не то, что использование инструментов позволяет сделать лучше вещи, которые уже делается, а то, что инструменты позволяют сделать вещи, которые без инструментов сделать невозможно. Должен существовать механизм проверки инструментов, появляющихся в этой сфере, механизм обучения пользованию ими, соответствующая инфраструктура - совершенно также как и в любой другой сфере деятельности.

В заключение сделаем несколько замечаний, являющихся результатом взгляда на межгосударственные отношения в современном мире с той позиции, в которой находится исследователь, занимающийся их изучением методом анализа и отработки сценариев. Нам представля-

ется, что характер межгосударственных отношений все менее соответствует характеру современной мировой экономической системы и характеру вооружений, которыми располагают государства, и если межгосударственные отношения не претерпят существенных изменений, в будущем нас ожидает мрачная картина, нарисованная в [6]: деление государств на развитых, благоденствующих и неразвитых – нищенствующих, высасывание из неразвитых стран всех видов ресурсов, в том числе – интеллектуальных, превращение неразвитых стран в свалку отходов и т.д.. Если сравнивать межгосударственные отношения с отношениями между людьми, то межгосударственным отношениям в значительно меньшей степени присуще то, что в отношениях между людьми именуется нравственными и этическими нормами, которые можно трактовать как элементы гомеостаза, самосохранения. Иногда кажется, что межгосударственные отношения в современном мире ближе к отношениям в стаде обезьян, чем к отношениям в самом примитивном человеческом обществе. Между тем, в современном мире члены мирового сообщества не могут обеспечить ни свою национальную безопасность ни экономическое процветание, игнорируя безопасность других ее членов, а также проблемы глобальной общечеловеческой безопасности – как экологической безопасности, связанной с воздействием на окружающую среду хозяйственной деятельности человека, так и социальной безопасности, связанной с возникновением вооруженных конфликтов с применением ядерного и химического оружия. Таковое игнорирование будет приводить не к увеличению, а к уменьшению их безопасности, создавая механизм дестабилизации, механизм увеличения вероятности возникновения вооруженных конфликтов между странами, а, значит, фактического увеличения количества конфликтов, механизм увеличения вероятности глобальной военной катастрофы. Метод имитационных игр – это один из инструментов, с помощью которого можно спроектировать и до определенной степени испытать механизмы стабилизации в жизни мирового сообщества [7].

В проблемах безопасности на первом месте по значимости сейчас стоит информационный аспект. Выше уже говорилось, что точное знание странами количества и эффективности вооружений друг друга и возможность адекватно, совершенно точно прогнозировать развитие вооруженных конфликтов создает механизм гонки разоружения. Утрируя ситуацию, чтобы подчеркнуть существо дела, можно сказать, что возможность совершенно точно прогнозировать развитие вооруженного конфликта (конечно, в реальности это недостижимо, а в имитационных играх – достижимо; это обстоятельство характеризует возможно-

сти, которыми обладает метод имитационных игр) создает механизм замены реальной вооруженной борьбы ее имитацией.

Нам представляется, что начинать эволюцию характера межгосударственных отношений в нужную сторону надо с введения в международное право нормы общего характера, суть которой состоит в том, что, если кто-либо имеет возможность произвести какое-либо глобальное воздействие и тем самым повлиять на жизнь всех людей, то об этом мировое сообщество должно быть по крайней мере информировано. Соккрытие такого рода информации следует объявить тяжким преступлением против человечества, влекущим жесткие санкции. Это совершенно очевидное с точки зрения общечеловеческой морали положение не соответствует современному характеру межгосударственных отношений, не соответствует тому, что считается "нормой" в этих отношениях. Между тем, оно ведет к важным и нетривиальным последствиям. Его применение означает, например, открытие всей информации о наличии у стран ядерного и химического оружия и введение жестких санкций против тех государств, которые скрывают такую информацию. Более обще, всякая человеческая деятельность, могущая повлиять на общепланетарные процессы, должна контролироваться и координироваться на основе адекватной ей глобальной информационной системы, находящейся под юрисдикцией международных организаций и это должно быть закреплено соответствующими нормами международного права.

Начало такой информационной системы может быть положено, если разведывательные и природоресусные космические системы США России, ведущие в настоящее время космический контроль в собственных интересах, будут синтезированы, поставлены под международный контроль, финансироваться международным сообществом, а соответствующая информация станет всеобщим достоянием. Ощущение, которое возникает у читателя после прочтения этой фразы, характеризует длину пути, который нужно пройти, чтобы перестать барахтаться в собственных нечистотах.

Литература

1. Венцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972, 552 с.
2. Иванилов В.Ю., Огарышев В.Ф., Павловский Ю.Н. Имитация конфликтов. М.: ВЦ РАН, 1993, 196 с.
3. Павловский Ю.Н. Имитационные системы и модели. М.: Знание, 6/1990, 46 с.
4. Павловский Ю.Н. Методические вопросы разработки системы

математических моделей, предназначенных для исследования проблем стратегической стабильности, национальной безопасности, строительства вооруженных сил. В кн. Стратегическая стабильность межгосударственных отношений и безопасность России. М.: ВАГШ, 1993. С.22-29.

5. Горелик В.А., Горелов М.А., Кононенко А.Ф. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. М.: Радио и связь, 1992, 288 с.

6. Моисеев Н.Н. Агония России. Есть ли у нее будущее?. Попытка системного анализа проблемы выбора. Зеленый мир. N 12. 1996 г.

7. Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. М.: Наука. 1987. 304 с.

Об одной простейшей модели коллективного поведения. Приложения и их интерпретация

П.С.Краснощеков

Исследуется простейшая модель коллективного поведения. Основное внимание уделено анализу типичных примеров, дается качественный анализ и содержательная интерпретация. На примере 3-го Съезда народных депутатов СССР анализируются количественные результаты голосования по принципиальным вопросам.

В наше непростое время проблема манипулирования общественным сознанием становится все более актуальной. Легче всего, конечно, обвинить темную природу человеческой души, но жизненный опыт и вера в людей подсказывают нам, что паталогия встречается редко, что почти каждый отдельно взятый человек от природы добр, что, будь на то воля каждого, в мире воцарились бы добро и справедливость. Л.Н.Толстой в свое время говорил, что виноваты не люди, а виноваты обстоятельства. И многие действительно уверены, что если изменить обстоятельства, то изменятся и люди. В основе всех революций лежит эта вера, для оправдания их создаются сложные (чаще всего недоступные пониманию рядового обывателя) социальные теории, однако история показывает, что сумма зла в мире от этого не убывает. Зло, к сожалению, обладает тем фундаментальным свойством, что обстоятельства для его проявления, когда это кому-то нужно, всегда предоставляются. Действительно, почему диктаторам всех времен и народов так легко удастся вовлечь массы людей в преступные деяния, социальное зло которых этими людьми осознается слишком поздно, либо не осознается вовсе? Какой механизм срабатывает в толпе, когда она кричит: "Убей его!", или "Долой, долой,...!", или скандирует: "Они не пройдут!", зачастую не удосуживаясь задуматься над тем, кто эти пресловутые "они". Социологи, по-видимому, имеют на это свои профессиональные ответы. Но автор этой статьи — не социолог, а специалист по прикладной математике, и его интересует следующий вопрос: существует ли достаточно простой формальный механизм (который может быть выражен на языке математики), объясняющий обсуждаемый феномен? Читателю, надеюсь, понятно, что ссылка на стадный инстинкт ничего не объясняет, т.к. непонятно, почему ему подвержены нередко люди вполне цивилизованные и по своей натуре отнюдь не агрессивные. Когда говорится о простоте механизма, то речь, естественно, идет о простых предпосылках и гипотезах, на основе которых этот механизм строится,

а не о простоте выводов, которые позволяет сделать математический анализ этого механизма.

Итак, рассмотрим простейшую математическую модель механизма коллективного поведения. В основу ее положим очевидную с точки зрения здравого смысла гипотезу о том, что индивидуум, принимая решение по тому или иному вопросу, руководствуется как своим личным отношением к данному вопросу, так и отношением к этому вопросу окружающих его субъектов (коллектива). Например, индивидуум может решать такие вопросы: заниматься ли ему данным родом деятельности, вступать ли в данную общественную организацию, участвовать ли в данном мероприятии, голосовать ли за данное предложение и т.д. и т.п. Во всех этих случаях (отвлекаясь от их содержательной стороны) индивидууму предстоит решать в сущности одну проблему: перейти ему в некоторое данное состояние или нет. Чтобы построить математическую модель поведения такого индивидуума, необходимо ввести количественные оценки его отношения к данному состоянию. Таких оценок в простейшем случае можно предложить две: личное (априорное) отношение к состоянию, которое определяется числом $0 \leq a_j \leq 1$, выражающим вероятность того, что индивидуум готов находиться в этом состоянии, и финальное (апостериорное) отношение (тоже, конечно, личное), сформированное после получения информации о поведении коллектива, которое определяется числом P_j , выражающим вероятность того, что индивидуум пришел в данное состояние. Например, некто априори против рыночной экономики, однако видя реакцию окружающих людей, определенная доля которых за такую экономику, может пересмотреть свое личное (априорное) отношение к этому вопросу, поддаться влиянию этих людей, и окончательное (апостериорное) решение принять в пользу рыночной экономики. Может, конечно, и не пересмотреть (если он личность независимая) своего отношения, т.е. его апостериорное отношение к вопросу будет совпадать с априорным. Очевидно, что математическая модель поведения должна быть такова, чтобы весь спектр индивидуумов от абсолютно зависимых до абсолютно независимых мог быть в ней представлен. Для этого необходимо ввести еще одну количественную характеристику индивидуума, число $0 \leq \mu_j \leq 1$, выражающее степень независимости индивидуума от состояния коллектива. Условимся считать, что $\mu_j = 0$ означает абсолютную зависимость, а $\mu_j = 1$ — абсолютную независимость.

Здесь предлагается наиболее простая из возможных модель для определения вероятностей финальных (апостериорных) состояний членов коллектива. Содержательная суть этой модели выражается в том,

что каждый индивидуум, определив так или иначе долю членов коллектива, пришедших в данное состояние, приходит сам в это состояние с вероятностью P_j , являющейся средневзвешенной величиной между априорной вероятностью и долей остальных членов коллектива, пришедших в данное состояние, с весовыми коэффициентами μ_j и $(1 - \mu_j)$ — соответственно. Формально это выглядит следующим образом:

$$P_j = \mu_j a_j + (1 - \mu_j) \Delta_j \quad (j = 1, 2, \dots, N),$$

где Δ_j — доля членов коллектива, пришедших в данное состояние, а N — общее число членов коллектива.

Чтобы данная модель стала замкнутой, т.е. чтобы из нее можно было определить финальные вероятности P_j каждого члена коллектива, необходимо долю Δ_j выразить через P_j . Это можно сделать естественно заменив Δ_j на математическое ожидание доли, т.е. на ее среднее ожидаемое значение:

$$\Delta_j = \frac{1}{N-1} \sum_{i \neq j} P_i.$$

Тогда наша модель окончательно примет вид:

$$P_j = \mu_j a_j + \frac{1 - \mu_j}{N-1} \sum_{i \neq j} P_i \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (1)$$

Таким образом, для определения финальных вероятностей мы имеем систему N линейных уравнений с N неизвестными. Не представляет особого труда построить решение этой системы. Для этого обозначим через M математическое ожидание числа субъектов пришедших в данное состояние: $M = \sum_i P_i$, и перепишем систему (1) в виде:

$$P_j = \frac{N-1}{N-\mu_j} \mu_j a_j + M \frac{1-\mu_j}{N-\mu_j} \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (2)$$

Если просуммировать левые и правые части этой системы по j от 1 до N , то получится уравнение для определения математического ожидания M :

$$M = \frac{(N-1)}{\sum_j} \frac{\mu_j a_j}{N-\mu_j} + M \sum_j \frac{1-\mu_j}{N-\mu_j},$$

откуда найдем, что:

$$M/N = \sum_j \frac{\mu_j a_j}{N-\mu_j} / \sum_j \frac{\mu_j}{N-\mu_j}. \quad (3)$$

Теперь достаточно M из (3) подставить в (2), чтобы получить выражения для финальных вероятностей P_j :

$$P_j = \frac{N-1}{N-\mu_j} \mu_j a_j + N \frac{1-\mu_j}{N-\mu_j} \sum_j \frac{\mu_j a_j}{N-\mu_j} / \sum_j \frac{\mu_j}{N-\mu_j}. \quad (4)$$

Во многих случаях нас будет интересовать поведение больших коллективов, когда N достаточно велико, т.е. $N \gg 1$. Тогда, пренебрегая величиной μ_j по сравнению с N , можно упростить формулы (3) и (4), приведя их к виду:

$$M/N = \frac{\sum_j \mu_j a_j}{\sum_j \mu_j}, \quad (5)$$

$$P_j = \mu_j a_j + (1 - \mu_j) \frac{\sum_j \mu_j a_j}{\sum_j \mu_j} \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (6)$$

Величина M/N представляет собой долю субъектов от общего числа субъектов в коллективе, пришедших в данное состояние. Анализом этой величины мы и займемся в дальнейшем.

Так как предложенная здесь модель поведения построена на основе примитивного здравого смысла, то оправданием ей может служить лишь проверка ее на простых и прозрачных примерах. Если окажется, что интерпретации, которые позволяет делать эта модель, в рассматриваемых примерах будут иметь содержательный смысл, то это будет с нашей точки зрения оправданием того примитивизма, на основе которого эта модель построена, и возможно придаст ей некоторую эвристическую ценность.

Проанализируем ряд примеров, расположенных по мере нарастания их сложности:

1. Все субъекты абсолютно зависимы.
2. Лидер в абсолютно зависимом коллективе.
3. Несколько лидеров в абсолютно зависимом коллективе.
4. Лидер (начальник) в однородном коллективе.
5. Рациональный количественный состав рабочего коллектива.
6. Парламент (на примере 3-го съезда народных депутатов СССР).
7. Рейтинг президента в парламенте.

1. Все $\mu_j = 0$. Это означает, что все субъекты абсолютно зависимы. Чтобы правильно воспользоваться формулой (3), ее нужно переписать в виде

$$M/N \sum_j \frac{\mu_j a_j}{N - \mu_j} = \sum_j \frac{\mu_j}{N - \mu_j},$$

откуда следует, что $M/N \cdot 0 = 0$, т.е. M/N может принимать любое значение от 0 до 1. То же самое относится и ко всем P_j . Такой коллектив абсолютно не ориентирован и его состояние неопределенно. Это напоминает толпу или стадо, в котором нет вожака. Поведение такого коллектива непредсказуемо, как и поведение толпы.

2. Все $\mu_j = 0$, кроме одного, например, $\mu_1 \neq 0$, т.е. в неориентированном стаде появился вожак, или в толпе лидер (трибун). В этом случае $M/N = a_1$ и все $P_j = a_1$, т.е. все субъекты копируют поведение лидера. Если лидер четко сориентирован по отношению к данному состоянию, т.е. $a_1 = 1$ или $a_1 = 0$, то и поведение коллектива однозначно: либо все находятся в данном состоянии ($a_1 = 1$), либо все нет ($a_1 = 0$). Таким образом, толпа абсолютно управляема: любой лидер может привести ее в любое нужное ему состояние. Если ситуация — экстремальная, а лидер психически неуравновешен, то он может толкнуть толпу на любые безрассудства, что неоднократно и наблюдалось в уличных сборищах и на митингах. Эта внушаемость толпы успешно используется лидерами различных партий. Поэтому интересно исследовать митинговую ситуацию, когда в толпе может быть несколько лидеров различной ориентации.

3. Все $\mu_j = 0$, кроме первых $n \ll N$, т.е. $\mu_1 \neq 0$, $\mu_2 \neq 0, \dots, \mu_n \neq 0$. Воспользовавшись формулой (5), получим:

$$M/N = \sum_{j=1}^n \mu_j a_j / \sum_{j=1}^n \mu_j.$$

Здесь интересны два случая, когда в коллективе всего лишь два лидера, придерживающихся противоположных взглядов ($a_1 = 1$, $a_2 = 0$), и когда есть еще третий лидер — центрист, занимающий среднюю позицию ($0 < a_3 < 1$). В первом случае $M/N = \mu_1/(\mu_1 + \mu_2)$, т.е. за первым лидером идет доля субъектов, равная $\mu_1/(\mu_1 + \mu_2)$, а за вторым, соответственно $\mu_2/(\mu_1 + \mu_2)$. Отсюда видно, что за более независимым лидером (например, $\mu_1 > \mu_2$) идет и большая часть субъектов. Выигрывает более уверенный лидер. Если оба лидера одинаково независимы, т.е. $\mu_1 = \mu_2$, то субъекты делятся пополам: $M/N = 1/2$.

В случае, если есть третий лидер ($\mu_3 \neq 0$, $0 < a_3 < 1$), то за первым лидером пойдет доля субъектов, равная $(\mu_1 + \mu_3 a_3)/(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)$, а за вторым — $(\mu_2 + \mu_3(1 - a_3))/(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)$. Напомним, что здесь речь идет о двух взаимоисключающих альтернативах: находиться в данном состоянии или нет, которые отражены в позициях первых двух лидеров.

Нетрудно видеть, что в случае $a_3 > 1/2$ третий лидер "работает" на первого, а в случае $a_3 < 1/2$ — на второго. Если он абсолютный центрист ($a_3 = 1/2$), то он выравнивает ситуацию, т.е. работает на более слабого лидера, у которого μ меньше. Если же первый и второй лидеры одинаково независимы ($\mu_1 = \mu_2$), то центрист никак не влияет на ситуацию, так как в этом случае $M/N = 1/2$ независимо от величины μ_3 . Таким образом, абсолютно центристская позиция в абсолютно зависимом коллективе абсолютно не эффективна — толпа такого лидера не слушает, она ориентируется на четкие позиции.

4. Рассмотрим теперь случай, когда в однородном коллективе (это не означает его абсолютной зависимости) имеется независимый, четко сориентированный на ситуацию лидер (начальник). Формально это означает следующее:

$\mu_1 = 1, \quad a_1 = 1$ — начальник,

$\mu_2 = \dots = \mu_N = \mu; \quad a_2 = \dots a_N = a$ — коллектив.

Подставляя эти данные в формулу (3), получаем:

$$M/N = [N - \mu + a\mu(N - 1)^2] / [N - \mu + \mu(N - 1)^2]. \quad (7)$$

Если в этой формуле устремить $N \rightarrow \infty$, то получим

$$\lim_{N \rightarrow \infty} M/N = a, \quad (8)$$

т.е. при больших N и $\mu \neq 0$ коллектив неуправляем, т.к. взаимное влияние членов коллектива друг на друга превышает влияние лидера на коллектив (подчеркнем, что это в том случае, если коллектив не является абсолютно зависимым, т.е. $\mu \neq 0$).

Когда же коллектив абсолютно управляем, т.е. в каких случаях он целиком следует за начальником ($M/N = 1$)? Нетрудно видеть, что это достигается в двух случаях: либо $\mu = 0$, т.е. субъект коллектива — человек стадный, либо $a = 1$, т.е. субъект коллектива человек разумный (предполагается, что позиция начальника разумна) — такой коллектив можно назвать обществом единомышленников. Так как в реальном рабочем коллективе крайние ситуации встречаются редко, то в общем случае ($\mu \neq 0, \quad a \neq 1$) возникает задача о рациональном количественном составе рабочего коллектива.

5. Пусть состав коллектива считается рациональным, если $M/N \gg Q$, где Q — некоторое заданное число. Из (7) получаем неравенство:

$$(Q - a)\mu(N - 1)^2 - (1 - Q)(N - 1) - (1 - Q)(1 - \mu) \ll 0. \quad (9)$$

Будем считать, что в стандартном коллективе $\mu = 1/2$, т.е. субъект в меру независим, и $a = 1/2$, т.е. субъект нейтрален к позиции начальника. Анализ неравенства (9) показывает, что при $Q = 3/4$ получаем $1 \leq N \leq 3$ — рабочая группа, при $Q = 2/3$ имеем $1 \leq N \leq 6$ — лаборатория, бригада и т.п.. С уменьшением Q , с падением эффективности коллектива, допустимый состав коллектива растет и при $Q = 1/2$ может быть как угодно большим ($1 \leq N \leq \infty$), т.е. в большом стандартном коллективе при одном начальнике половина всегда будет бездельничать. Отсюда следует, что большие коллективы необходимо структурировать, т.е. вводить подразделения, оргструктуру, иерархию подчинения, что и наблюдается в жизни.

В заключение этого пункта вернемся к формуле (3). Как уже было показано, если в обществе есть лидер, то общество целиком идет за ним лишь в двух крайних случаях: либо когда ментальность общества стадная ($\mu_j = 0$), либо когда общество разумно консолидируется с лидером ($a_j = a_1 = 1$), т.е. все общество есть общество единомышленников. В общем же случае, как это следует из (3), когда набор μ_j и a_j произволен (такое общество естественно назвать плюралистическим), достигнуть полной управляемости ($M/N = 1$) не удастся. Так как надеяться, что все общество будет обществом разумных единомышленников, не приходится, естественно, у лидера возникает соблазн использовать стадную ментальность общества, а независимых и инакомыслящих тем или иным способом изолировать от участия в общественной жизни. При этом совершенно неважно, стремится ли лидер, например, к построению коммунистического распределительного рая или демократической рыночной идиллии.

Стадная ментальность общества есть благоприятная почва для произрастания тоталитаризма независимо от декларируемых лидером целей. Отсюда, между прочим, следует сомнительная ценность референдумов при монополии на средства массовой информации.

Прежде чем переходить к анализу следующего примера, постараемся сделать некоторые общие выводы из уже исследованных ситуаций. Вернемся снова к предпосылкам модели. Из них, как мы помним, следует, что личность каждого индивидуума характеризуется двумя параметрами. Параметр a_j , характеризующий его априорное отношение к состоянию, есть характеристика, во многом отражающая личные предпочтения индивидуума, которые сложились у него в процессе формирования моральных ценностей, склонностей и интересов, т.е. тех качеств личности, которые во многом определяются социальной средой обитания индивидуума. Этот параметр выражает то отношение к

ситуации, которое индивидум декларирует, так сказать, теоретически. Эти декларации могут выглядеть по разному с точки зрения общечеловеческих ценностей, но это еще не повод давать категорические оценки самому индивидууму как личности, пока его намерения не проявятся в поступках (в действии). Способность же к тому или иному действию, как видно из модели, во многом определяется параметром μ_j , характеризующим степень независимости индивидуума. Этот параметр тоже формируется в процессе жизни индивидуума, но в большей степени, как нам кажется, определяется врожденными качествами характера: твердость, мягкость, упрямство, гордость, замкнутость, податливость и т.п. Лишь взаимодействие параметров a_j и μ_j через механизм модели с определенной вероятностью P_j рождает поступок, и в этом как раз и проявляется объективная сущность коллективного поведения. Поэтому прав Л.Н.Толстой, когда говорит, что виноваты не люди, а обстоятельства, однако обстоятельства всегда имеют возможность представиться. Никто не станет утверждать, что зависимые люди это плохие люди, однако коллектив таких людей легко направить не только на добрые, но и на дурные поступки. Независимые люди тоже ничем не плохи, но они могут стать жертвами априорных заблуждений, повлиять на которые будет очень трудно.

6. До сих пор мы проверяли построенную модель на качественное соответствие действительности. В этом пункте мы попытаемся на материалах 3-го съезда народных депутатов СССР проверить ее на количественное соответствие, т.е. вычислить на основе модели некоторые количественные характеристики и сравнить их с данными по 3-му съезду. Естественно, может возникнуть вопрос: почему выбран именно этот съезд? Дело в том, что по этому съезду были достаточно подробные материалы, которыми располагал автор, а также в том, что структура депутатского корпуса тех времен была проста и прозрачна. Легко просматривалась партия будущего президента, оппозиция и так называемое "болото". К тому же можно считать, что этот съезд уже в историческом прошлом, и обращение к его материалам уже ни чьих интересов не затрагивает.

Итак, пусть имеется парламент, который состоит из N членов, среди которых q членов партии президента, p членов оппозиции, а остальные $r = N - q - p$ — "болото". Естественно считать, что у президента и его партии имеется твердая независимая позиция по каждому обсуждаемому вопросу и при голосовании они действуют как единое целое, т.е. $a_j = 1$ (в тех случаях, когда они голосуют против, естественно, $a_j = 0$, но, очевидно, что вопрос можно в модели переформулировать как про-

тивоположный и тогда всегда будет $a_j = 1$). Оппозицию также будем считать единой в решениях, т.е. группой независимых единомышленников, у которой, в отличие от партии президента, $a_j = 0$. "Болото" будем считать однородным: все $\mu_j = \mu$, $a_j = a$. Голосованию "за" соответствует $a_j = 1$, голосованию "против" — $a_j = 0$. Воздержавшиеся в рамках этой модели ничем не отличаются от неучаствовавших в голосовании, и мы их будем отбрасывать.

Воспользуемся формулой (5). Из нее следует, что "за" проголосует доля депутатов, равная:

$$M/N = (q + \mu \cdot a \cdot r) / (p + q + \mu \cdot r). \quad (10)$$

Если "болото" абсолютно зависимо, то $\mu = 0$, и последняя формула примет вид:

$$M/N = q / (p + q) = c. \quad (11)$$

Последняя величина имеет определенный внутренний смысл для данной модели. Анализируя формулу (10), нетрудно усмотреть, что в случае $a < c$ президенту выгодно, чтобы представители "болота" были более зависимы (чем меньше μ , тем лучше), т.е. президент заинтересован в существовании "болота" (у идеального "болота" $\mu = 0$). Если же $a > c$, то президенту выгодно, чтобы μ было больше, т.е. он не заинтересован в существовании такого "болота".

Обработка данных 3-го съезда показывает, что на нем партия президента составляла примерно $q = 1000$ человек, оппозиция около $p = 250$ человек, остальные r представляли "болото". Здесь следует дать некоторое разъяснение. Так как на каждом голосовании присутствовали и голосовали отнюдь не все депутаты, то с вычислением r есть определенные трудности. Чтобы их обойти, придется принять гипотезу, что все представители партии президента и оппозиции, как наиболее заинтересованные, практически полностью участвовали в голосовании. Тогда количество представителей "болота" от голосования к голосованию будет меняться и поэтому будет вычисляться отдельно по данным съезда в каждом голосовании. Выручает также и тот факт, что в случае идеального "болота", у которого $\mu = 0$, как видно из формулы (11), от величины "болота" результат не зависит. Идеальное "болото" при голосовании делится в пропорции $c = q / (p + q)$.

Обрабатывая результаты съезда, мы выделили только те вопросы, по которым у оппозиции с партией президента были принципиальные разногласия. Таких вопросов оказалось совсем немного, и результаты голосования по ним сведены в следующую таблицу (предварительно

вопросы переформулированы так, чтобы партия президента голосовала "за", а оппозиция "против").

Таблица 1.

за	1538	1505	1546	1542	1485	1507	1398	1464	1428
против	374	349	352	368	452	399	409	463	485
воздерж.	47	112	52	76	66	73	163	41	74
всего	1959	1966	1950	1986	2003	1979	1970	1968	1987
всего –									
– воздерж.	1912	1853	1898	1910	1937	1906	1807	1927	1913
% голосов									
"за"	80%	81%	81%	81%	77%	79%	77%	76%	75%

Примем простейшую гипотезу, что на этом съезде было идеальное "болото", т.е. $\mu = 0$. Тогда для подсчета процента голосов "за" можно воспользоваться формулой (11). Получаем:

$$M/N \cdot 100 = 1000/(1000 + 250) \cdot 100 = 80\%. \quad (12)$$

Из (12) видно, что мы получили результат, близкий к наблюдаемому. В среднем относительная ошибка составляет около 1%, но, как видно из таблицы, по отдельным голосованиям она колеблется и достигает максимума порядка 6–7%. Возникает вопрос: возможно ли так естественно подправить модель, чтобы добиться хорошего совпадения по каждому голосованию?

Для этого, нам кажется, необходимо ввести в модель влияние поведения президента на депутатов при обсуждении вопросов, подлежащих голосованию. Фактически это влияние, как это будет видно в дальнейшем, распространяется лишь на представителей "болота", т.к. оппозиция и партия президента состоят из абсолютно независимых членов.

7. В исходной модели было одно весьма сильное упрощение. В ней не персонифицировалось взаимное влияние субъектов друг на друга. Оставаясь в рамках линейности, можно обобщить модель, введя матрицу взаимных влияний субъектов:

$$(\lambda_{ji}), \quad (13)$$

где из условия нормировки: $\sum_i \lambda_{ji} = N - 1$.

Уравнения для определения финальных вероятностей P_j примут вид:

$$P_j = \mu_j a_j + \frac{1 - \mu_j}{N - 1} \sum_{i \neq j} \lambda_{ji} P_i \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (14)$$

Точную матрицу взаимных влияний нам, к сожалению, знать не дано. Поэтому придется делать упрощающие предположения. Будем считать, что влияние президента на депутатов одинаково для всех депутатов и равно $\lambda_{j1} = \lambda_0$ ($j \neq 1$), а влияние депутатов друг на друга также одинаково и равно $\lambda_{ji} = \lambda_0$ ($j \neq 1$ и $j \neq i$). Влияние депутатов на президента несущественно, т.к. президент абсолютно независим ($\mu_1 = 1$), т.е. $P_1 = a_1 = P_o$. Назовем λ_o рейтингом президента, а λ — рейтингом рядового депутата. Эти рейтинги связаны условием нормировки:

$$\lambda_o + \lambda(N - 2) = N - 1. \quad (15)$$

Матрица взаимных влияний принимает вид:

$$\begin{pmatrix} 0 & \lambda & \lambda & \dots & \lambda \\ \lambda_0 & 0 & \lambda & \dots & \lambda \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_0 & \lambda & \lambda & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Используя матрицу (16) и соотношение (15) перепишем (14) в виде

$$P_j = \mu_j a_j + \frac{1 - \mu_j}{N - 1} \lambda \sum_{i \neq j} P_i + (1 - \mu_j) P_o \left[1 - \lambda \frac{N - 2}{N - 1} \right] \quad (j = 2, 3, \dots, N). \quad (17)$$

Вводя, как и в предыдущих случаях, долю субъектов M/N , пришедших в данное состояние, получим для этой доли (при больших N) следующую формулу:

$$M/N = \frac{\sum_j \mu_j a_j + (1 - \lambda) P_o \sum_j (1 - \mu_j)}{N - \lambda \sum_j (1 - \mu_j)},$$

которая, как легко видеть, переходит в формулу (5) при $\lambda = 1$.

Конкретно, для нашего съезда, получаем:

$$M/N = [q + (1 - \lambda) P_o r] / [p + q + (1 - \lambda) r]. \quad (18)$$

Как видно из (18), теперь результат голосования зависит от количественного состава "болота". И это естественно, т.к. эти депутаты подвержены влиянию в силу своей повышенной зависимости.

Изложим дальнейшие соображения. Тот, кто смотрел съезд по телевизору, или читал его материалы, возможно заметил, а кто не заметил, должен поверить на слово, что поведение президента, когда он вел съезд, было отнюдь не всегда беспристрастным. В некоторых случаях он проявлял явную заинтересованность в положительных результатах

голосования, в некоторых случаях казался безразличным, а иногда даже казалось, что он может проголосовать против. Наблюдая за поведением президента, представители "болота" в силу своей повышенной зависимости делают выводы и вносят коррективы в голосование. Нам кажется, что с точки зрения представителей "болота" результаты таблицы 1 можно сгруппировать по следующему принципу: в первую группу отнести все результаты голосований, когда представителю "болота" казалось, что президент проголосует "за" ($P_o = 1$); во вторую группу результаты, когда возникало ощущение, что президент колеблется ($P_o = 1/2$); в третью группу, когда можно было подумать, что президент проголосует "против" ($P_o = 0$). При такой перегруппировке таблица 1 примет вид:

Таблица 2.

	$P_o = 1$				$P_o = 1/2$			$P_o = 0$		средн.
за	1538	1505	1546	1542	1485	1507	1398	1464	1428	1490
против	374	349	352	368	452	399	409	463	485	406
воздерж.	47	112	52	76	66	73	163	41	74	78
всего	1959	1966	1950	1986	2003	1979	1970	1968	1987	1974
всего –										
– воздерж.	1912	1853	1898	1910	1937	1906	1807	1927	1913	1896
г	662	603	648	660	687	656	557	677	663	646
% голосов										
"за"	80%	81%	81%	81%	77%	79%	77%	76%	75%	79%

Подставляя данные таблицы 2 в формулу (18), получим серию уравнений для определения λ при каждом голосовании. Решение этих уравнений дает следующий ряд значений величины λ : 1,00; 0,89; 0,89; 0,90; 0,80; 0,93; 0,75; 0,90; 0,87. Разброс значений не удивителен, т.к. в этом проявляется неустойчивость обратной задачи, из которой определяется λ . Для расчетов естественно пользоваться средним значением $\lambda = 0,88$. При этом мы будем также использовать среднее значение $r = 646$. Итак, формула (18) принимает вид:

$$M/N = (1000 + 0.12P_o646)/(1250 + 0.12 \cdot 646) = (1000 + 77P_o)/1327.$$

Используя эту формулу, получаем:

$$\begin{aligned} \text{при } P_o = 1 \quad M/N &= 1077/1327 = 0,81 \\ \text{при } P_o = 1/2 \quad M/N &= 1039/1327 = 0,78 \\ \text{при } P_o = 0 \quad M/N &= 1000/1327 = 0,75. \end{aligned}$$

Это дает совпадение с данным съезда по группам с точностью выше 1%, что можно считать идеальным совпадением.

Итак, рейтинг рядового депутата равен $\lambda = 0,88$. Подсчитаем рейтинг президента:

$$\lambda_o = 1895 - 0,88 \cdot 1894 = 226,$$

т.е. рейтинг президента на 3-м съезде был очень высок, он превосходил рейтинг рядового депутата в $226/0,88 = 257$ раз. Таким образом, влияние президента было эквивалентно влиянию 257 рядовых депутатов.

На этом съезде выбирали президента. Результаты голосования оказались ниже, чем предсказывает эта модель при данных $q = 1000$ и $p = 250$. Это объясняется тем, что часть партии будущего президента выступила против. Но это все уже история — ”дела давно минувших дней, преданья старины глубокой”.

Содержание

П.С.Краснощеков. Вступительное слово.	3
Г.С.Поспелов. Об исследовании операций и искусственном интеллекте.	6
А.А. Петров. Исследование операций и математическое моделирование.	10
И.Г. Поспелов. Исследование операций и моделирование экономического развития.	21
Ю.Е.Малашенко. Исследование операций и сетевые системы.	37
Ю.Н. Павловский. Метод имитационных игр в проблемах геополитики, безопасности, межгосударственных отношений.	44
П.С.Краснощеков. Об одной простейшей модели коллективного поведения. Приложения и их интерпретация.	57