

УДК 330.341.424 (470+571)

**ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ НОВОЙ
ИНДУСТРИАЛИЗАЦИИ МИРА РОССИИ –
ДИСКРЕТНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ,
КОГНИТИВНЫЕ ЦЕНТРЫ РАЗВИТИЯ
ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Т.С. Ахромеева

*научный сотрудник Института прикладной
математики им. М.В. Келдыша РАН к.ф.-м.н.*

Г.Г. Малинецкий

*научный сотрудник Института прикладной
математики им. М.В. Келдыша РАН, д.ф.-м.н., профессор*

М.Е. Степанцов

*научный сотрудник Института прикладной
математики им. М.В. Келдыша РАН, к.ф.-м.н., доцент*

С.А. Торопыгина

*декан факультета «Прикладная математика
и информационные технологии» Института прикладной
математики им. М.В. Келдыша РАН к.ф.-м.н., доцент*

А.В. Колесников

*научный сотрудник Института философии НАН Беларуси,
к.ф.н., доцент*

П.В. Куракин

*Научный сотрудник Института проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН*

Постановка проблемы. В послании Президента Федеральному собранию 01.03.2018 в качестве основного препятствия на пути в будущее была обозначена ее *отсталость* в технологическом, экономическом, социальном пространствах. Растущий технологический разрыв между Россией и ведущими странами создает угрозу для национальной безопасности страны, для всего мира России. Встает вопрос, как и на какой технологической основе можно добиться перемен к

лучшему, как оптимальным способом кардинально улучшить сложившееся положение дел.

Ответ на него в большой степени дает *теория гуманитарно-технологической революции* [1]. В этой теории наглядно показывается вектор развития социально-технологической системы. Если для индустриальной фазы развития цивилизации имел место императив «*Человек для экономики*», курс на стандартизацию, взаимозаменяемость в различных сферах жизнедеятельности, на массовые социальные сущности (производство, потребление, культуру, армии, образование, оружие массового уничтожения), то сейчас ситуация кардинально меняется. На первый план выходит императив «*Экономика для человека*», повышение роли субъектов развития, стремительный рост разнообразия и высокий темп перемен в обществе, уменьшение времени на принятие важных решений и рост цены возможных ошибок. Кроме того, растет *уровень рефлексивности общества* – мир вступает в эпоху самосбывающихся прогнозов – часто происходит то, чего мы особенно боялись. Наши ожидания, оценки, мировоззрение оказываются большой силой.

Другими словами, современное общество в целом и мир России в частности, столкнулись с *вызовом сложности*. Он проявляется в том, что перед нами открываются различные возможные траектории развития, но для их выбора необходим прогноз возможных траекторий мир-системы на 30-50 лет. Здесь надо говорить, скорее, не о стратегическом, а об историческом прогнозе [2]. Другими словами, необходимы инструменты и математические модели, ориентированные на поддержку *целеполагания*. Второй класс моделей, востребованных на границе между индустриальной и постиндустриальной фазами развития мир-системы, – это *модели согласования интересов субъектов*, формирования «правил игры с непротиворечивыми интересами», которые позволяют всем участникам взаимодействия более, успешно и эффективно достигать поставленных целей, чем в случае, если они будут действовать по отдельности или, тем более, «играть друг против друга».

Наконец, нужен ещё большой *класс моделей, позволяющих быстро и эффективно решать задачи оперативного управления, анализа рисков, поддержки принятия рутинных решений*, в минимальной степени требующих привлечения человека.

Перефразируя Эйнштейна, можно сказать, что мы должны отдать подобным системам настолько много, насколько возможно, но не более этого.

И в России, и в Беларуси на правительственном уровне были приняты программы развития цифровой экономики. В них предусмотре-

ны такие проекты как «умный город», автоматизация делопроизводства, цифровое здравоохранение, внедрение блокчейн-технологий и ряд других. Однако, ключевые, наиболее важные для общества технологии, ориентированные на решение стратегических, а не тактических задач, «выпали» из этих программ. Их принципиальное значение не осознается – например, к выполнению российской программы развития цифровой экономики, к их сопровождению и экспертизе полученных результатов вообще не предполагается привлекать научные организации. Возникает необходимость «поставить цифровую экономику с головы на ноги» и сориентировать её на решение наиболее важных задач, которые в обозримой перспективе предстоит решать нашей цивилизации. Ряд шагов, направленных на это, и обсуждается в данных заметках.

ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕКОМЕРНЫХ СИСТЕМ. ОТ ТРАДИЦИИ К НОВАЦИЯМ

Античная и средневековая математика оперировала либо с целями числами, либо с числами, которые можно было построить с помощью циркуля и линейки, имея заданный единичный отрезок. Классический пример дает математическая модель Фибоначчи, призванная описать рост популяции

$$F_{n+1} = F_n + F_{n-1}, \quad F_0 = a, \quad F_1 = b, \quad n = 1, 2, \dots,$$

где a и b – целые числа, n – дискретное время, F_n – численность популяции в момент n .

В ходе научной революции XVII в., связанной с именами Ньютона, Лейбница, с анализом бесконечно малых, родился новый язык, ориентированный на описание природы с помощью непрерывных величин и дифференциальных уравнений

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{f}(\vec{x}), \quad \vec{x}(0) = \vec{x}_0, \quad 0 \leq t < \infty.$$

Время здесь непрерывно, мы можем отмерить сколь угодно малый его промежуток. Дифференциальные уравнения на три с лишним веком стали языком, на котором формулируются законы природы и фундаментальные математические модели (уравнение Ньютона, модели гидродинамики, теории упругости, уравнения гидродинамики Максвелла, Шредингера – важнейшие достижения нашей культуры). Какова причина этого? Вероятно, основная причина состоит в атомарной структуре вещества. Это позволяет усреднять интересующие нас величины по большому числу микрочастиц, вводить понятие «физически бесконечно малого объема», развивать концепцию сплошной среды.

Кроме того, основными «заказчиками» математических моделей были физика, техника, химия, отчасти экономика. Если в Античности математика была «наукой о числах и фигурах», то после ньютоновской революции она стала и наукой о движении. Такая математика меняет и понятие числа, которое становится бесконечной последовательностью десятичных цифр. Неявно предполагается, что мы можем измерять подобные числа бесконечно точно.

Однако приоритеты науки меняются. Философы всё чаще называют прошедшие три века активного развития естественных наук Новой Античностью. Так же, как в классической Античности, вектор интересов познающего субъекта направлен вовне, стремительно развиваются технологии, нормой считается экстравертная ориентация, — путешествия, торговля, строительство в различных ипостасях.

Но Античность сменило Средневековье. Новую Античность должно сменить Новое Средневековье с его вниманием к человеку, интровертной ориентацией, приматом духовного над материальным. Интересно, что термин Новое Средневековье был введен выдающимся русским философом Н.А.Бердяевым. В центре внимания в этот период истории оказывается не внешний мир природы, а внутренний мир человека, проблемы этики, морали, религиозных воззрений.

И действительно, в 1970-х гг., по сути, завершился период активной космической экспансии, эпохи развития пилотируемой космонавтики, началось создание и развитие виртуальной реальности как социального феномена. Наступило время цифровой революции.

Основными «заказчиками» разработки новых математических моделей и алгоритмов становятся медицина (каждая третья научная работа, выполняемая в мире, относится к этой области знания), социология, психология, история, управление, информационная инфраструктура (социальные сети, разнообразные системы мониторинга) и ряд других, непосредственно связанных с описанием, анализом, контролем, прогнозом действий людей и коллективов.

Это потребовало и других математических моделей, и иного математического языка — языка дискретных математических моделей. Это возврат на новом уровне к античной традиции, ориентированной на использование целых чисел и анализ качеств исследуемых объектов, «новую мифологию», — описание стандартных, модельных ситуаций, на основании которого можно осмысливать происходящее и выбирать оптимальный вариант собственных действий. Если три века в центре внимания были непрерывные модели, дифференциальные уравнения, дифференциальная геометрия, анализ «бесконечно малых», функциональный анализ, рассматривающий возможность пре-

дельного перехода к сколь угодно малым величинам, то сейчас на авансцену выходит дискретная математика. Видимо, она в ближайшем будущем станет основой для описания человекомерных систем.

Каковы причины этого? Обратим внимание на несколько наиболее важных:

1. Во многих задачах нужно делать выбор из немногих альтернатив («да – нет», «за – против» и т.д.).

2. Описание небольших групп или ансамблей, что типично, например, для нанотехнологий, не допускает процедуры осреднения. Каждый элемент множества оказывается существенным. «Два землекопа и две трети», о которых говорит ученик в одном детском стихе, не является удовлетворительным ответом во всё большем количестве задач.

3. Широкое использование компьютеров потребовало «перевода» непрерывных математических моделей, на которых сформулированы многие фундаментальные законы природы, на «понятный компьютеру» дискретный язык (теория разностных схем и другие разделы вычислительной математики). В силу отсутствия предельного перехода в дискретном мире (мы реально не можем устремить шаги по пространству h и времени τ к нулю) нам вновь и вновь приходится «договариваться», исходя из точности доступных данных и требуемого ответа, что мы будем считать «малым», а что нет. Поэтому, возникает соблазнительная мысль «договариваться» на начальном, а не на заключительном этапе и формулировать законы природы на дискретном языке. Эти попытки предпринимаются вновь и вновь. К такому развитию нашего знания подталкивает и квантовая механика, в которой, как правило, набор потенциально возможных результатов измерения характеристик системы оказывается дискретным.

4. Специалисты по принятию решений, психологи, медики, преподаватели доказывают или осознают, исходя из собственного опыта, что у нас во внутреннем пространстве нет «действительного числа», а есть лишь несколько градаций – отлично, хорошо, удовлетворительно. Даже когда у нас есть возможность оценивать знания студента или работу губернатора по 100-бальной шкале, мы не можем эффективно это делать.

5. Наши возможности выбирать, взаимодействовать с людьми, оценивать весьма ограничены. Психологи утверждают, что активно, творчески мы можем работать с 5-7 людьми (с остальными стереотипно или опосредованно), а принимая решения, учесть лишь 5-7 параметров или факторов. Происходит, говоря языком синергетики, «субъективная самоорганизация» – отражение и упрощение про-

цессов сложного внешнего мира в наше внутреннее пространство. Естественно, математические модели человекомерных систем так или иначе будут учитывать эти реалии.

6. «Тезис Уолфрема». Американский математик и программист С.Уолфрем выдвинул фундаментальный довод в пользу перехода от непрерывного к дискретному моделированию и от аналитических вычислений к прямой численной имитации. В каких задачах естествознания ученым удалось добиться наибольших успехов? Это либо динамические системы с небольшим числом переменных, допускающих интегрирование (типичный пример – классическая небесная механика) или сводящихся к ним (например, линейные модели теоретической физики). Либо системы из большого числа *одинаковых* объектов. В теории алгоритмов такие системы можно сопоставить с *вычислительно приводимыми системами*, с задачами, для которых есть быстрый алгоритм или короткий путь решения. Например, чтобы сложить два N -значных числа, нам нет нужды, как это делали древние племена, разбивать их на единицы и складывать их. Десятичная запись и алгоритм сложения «в столбик» позволяют сэкономить усилия.

Однако, есть «вычислительно неприводимые» задачи, где короткого пути нет, и нам, например, нужен полный перебор или пошаговая имитация исследуемого процесса. Другими словами, мы не можем «заглянуть в ответ», не проведя последовательно всех необходимых вычислений. По мнению Уолфрема, такая *невычислимость* характерна для эволюции многих сложных систем и большинства «чело­векомерных» задач.

Невычислимость, требующая пошаговой имитации при построении модели, естественно, предполагает как можно более простое описание, включающее минимум осложняющих факторов. Отсюда следует, что модели большинства достаточно сложных явлений и процессов должны быть *дискретными и имитационными*.

Однако, на наш взгляд, и этот класс инструментов, ориентированных на анализ и прогноз динамики человекомерных систем, следует сузить. Обратимся к традиции, сложившейся в этой области.

Появление компьютеров предвосхитили работы Поста, Черча и, прежде всего, Тьюринга. Машина Тьюринга, состоящая из головки, которая может находиться в конечном наборе (дискретных в силу конечности) состояний и бесконечной ленты, на которой записаны символы 0, 1, и STOP, оказалась универсальной моделью вычислений. По сути дела, все компьютеры являются несовершенным воплощением машины Тьюринга, которая может выполнять вычисления любой сложности.

Следующим шагом стало основополагающее исследование Дж.Неймана, поставившего задачу моделирования самовоспроизво-

дящихся систем. Для этого он ввел новый класс математических моделей – *клеточные автоматы*. Эти объекты заданы в простейшем случае на бесконечной доске с дискретными координатами $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (аналог оси x) и $j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (аналог оси y). Каждая клетка может находиться в момент $t = 1, 2, \dots$ в одном из p состояний $S^t(i, j)$. Эволюция данной клетки задается правилом

$$S^{t+1}(i, j) = F(S^t(k, l)), \text{ где } k, l \in G(i, j),$$

где клетка с координатами (k, l) принадлежит окрестности клетки (i, j) . Типичны окрестности, имеющие с данной общие ребра $(i + 1, j)$; $(i - 1, j)$; $(i, j + 1)$; $(i, j - 1)$ или общие вершины (тогда окрестность составляет 8 клеток, окружающих данную). Иногда в окрестность включают и саму клетку (i, j) .

Другими словами, клеточные автоматы подразумевают *локальность*. И это свойство тоже характерно для человекомерных систем. Психологи утверждают, что активно, творчески человек может взаимодействовать не более чем с 5-7 людьми, составляющими его окрестность или ближайший круг. Их действия и мнения являются для него особенно значимыми и должны учитываться им в первую очередь.

В отличие от систем обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных для простейших клеточных автоматов была доказана их эквивалентность машине Тьюринга. В частности, таким автоматом является игра «Жизнь», предложенная британским математиком Дж. Конвеем в 1970-м гг. Правила этого автомата удивительно просты. Соседями данной клетки являются 8 соседей, имеющих с ней общие вершины или ребра. Клетка может находиться в двух состояниях – быть живой или мертвой. Живая в момент времени t клетка в момент $t + 1$ становится мертвой или «от скуки» (когда в момент t у неё меньше двух живых соседей) или от перенаселения (когда живых соседей больше трех). Мертвая в момент t клетка «оживает», если в момент t у неё было три живых соседа.

В этой игре есть множество удивительных структур, но вероятно, наиболее важными являются «планеры»,двигающиеся по диагонали и повторяющие себя каждые 4 шага. В некоторых фазах столкновение этих планеров приводит к их аннигиляции. Кроме того, была найдена конфигурация клеток, называемая «планерным ружьем», которая порождает поток планеров. Такие конфигурации позволяют организовывать «провода», передающие 0 и 1 (1 соответствует наличию планера в потоке, 0 – его отсутствию) и логические элементы И и ИЛИ. Наличие «проводов» и логических элементов позволяет «сделать» универсальную вычислительную машину, задав в клеточном автомате

«Жизнь» некую конфигурацию живых клеток. Начальные данные задаются в виде последовательности планеров. К этому выводу приводят и строгие рассуждения.

Естественно, вычисления в такой «клеточной среде» могут обладать очень высокой степенью параллельности. Если ещё десятилетия назад на подобные вычисления смотрели как на забавную «игрушку», не имеющую практического воплощения, то широкое использование графических процессоров и построение «машин клеточных автоматов» заставляет пересмотреть этот взгляд. Кроме того, миниатюризация интегральных схем привела к тому, что «толщина линии» (размер минимального элемента, который может быть создан на кристалле) уже составляет 7 нм. При атомном пределе 0,1 нм (при котором принципиальным становятся квантовые эффекты и нельзя строить компьютеры на прежних принципах) нужны локальные связи. Поэтому вызывают интерес новые парадигмы вычислений, при которых связи между логическими элементами должны быть короткими, простыми и локальными. Этим требованиям, возникающим при переходе на молекулярный уровень, клеточные автоматы удовлетворяют в полной мере.

Наконец, следует обратить внимание ещё на одно направление, связанное с автоматами, основы которого были заложены в научной школе академика И.М. Гельфанда в Институте прикладной математики АН СССР. Это моделирование адаптационного и целенаправленного поведения в стохастических средах с меняющимися свойствами. Конечный автомат (клеточный, в котором вся окрестность представлена им самим) может быть наделен памятью и связанной с ней способностью к рефлексии. Он может «записать в память» стратегию своих прежних действий, если она привела к хорошему результату и извлечь его оттуда в ситуации выбора. Неудача заставляет переоценивать свои приоритеты и изменять записанное в памяти. Это перспективное направление, связанное с рефлексивными процессами и играми автоматов, бурно развивалось в 1970-е гг., однако затем было «отложено» до лучших времен, поскольку не было задач и аппаратных возможностей, требующих таких вычислительных парадигм. Вставшие проблемы решались более привычными, традиционными способами. Но сейчас такие задачи появились!

ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕКОМЕРНЫХ СИСТЕМ И МОДЕРНИЗАЦИЯ РОССИИ

Авторы этих заметок решали ряд конкретных частных задач с помощью дискретных моделей в разных областях, связанных с человекомерными системами. Это позволяет осмыслить методологию вы-

полненных работ и представить направление исследований и разработок, которые представляется нам наиболее перспективным в контексте российской модернизации.

В условиях ограниченности ресурсов и быстрых изменений в научно-техническом и социально-экономическом пространствах принципиальное значение приобретает прогноз, выработка управленческих решений на основе анализа их наиболее вероятных последствий и адаптация системы уравнений к происходящим изменениям. Эти задачи должны относиться к разным пространственным и временным масштабам и разным уровням систем управления. Другими словами, речь должна идти о иерархии моделей, на которые могли бы опираться государственные органы, крупные компании, общественные организации.

Здесь приходится прокладывать путь между Сциллой и Харибдой, искать компромисс между тремя взаимно противоречивыми требованиями:

Сложностью, необходимой, чтобы отразить наиболее важные причинно-следственные связи между объектами, субъектами и процессами, подлежащими моделированию;

Доступностью. Руководитель не может обычно принять решение, которого не понимает и не может обосновать. В отличие от многих других областей в человекомерных системах при моделировании, прогнозе и обосновании решения с практической точки зрения во многих задачах это требование является решающим. Другими словами, компьютеры так или иначе должны «объяснить» человеку, почему следует действовать так, а не иначе и на основе каких данных и критериев, возможно, прецедентов или дополнительной информации, он пришел к таким выводам.

Адаптируемость. Модель, с одной стороны, должна учитывать особенности и специфику данного объекта или процесса, а с другой должна быть в значительной степени «стандартной» и отчуждаемой от разработчика, встраиваемой в систему моделей, которые используются в управлении.

В той или иной степени эти пожелания воплощены в моделях, о которых речь пойдет ниже и, тем не менее, это скорее не достигнутый результат, а направление, по которому стоило бы двигаться.

Результатом в плановой экономике могла бы стать общегосударственная автоматизированная система (ОГАС), проект которой был выдвинут в своё время академиком В.М.Глушковым. В более быстрой, сложной и многоагентной рыночной экономике целью является, скорее, «направляемое развитие», идеи которого развивались в научной

школе академика Н.Н.Моисеева в Вычислительном центре им. А.А.Дородницына [3]. В этом случае субъекты, опирающиеся на объективные данные и результаты моделирования, могут гораздо эффективнее согласовывать интересы и искать компромиссы, ставить перед собой более масштабные задачи и использовать синергетические эффекты.

Прямая имитация. Имея современные вычислительные возможности, можно «дойти до каждого человека, до отдельного элемента» (в физике это направление называют молекулярной динамикой). И в ряде человекомерных систем это имеет смысл. Таковы, к примеру, задачи проектирования инженерных сооружений, где следует заботиться, чтобы в случае пожара все люди имели возможность выйти из помещения. Таковы задачи архитектурной и транспортной планировки. Огромные проблемы мегаполисов, связанные с постоянными пробками или отсутствием мест на парковке обусловлены тем, что эти задачи либо не ставились, либо решались неудовлетворительно, без серьезного привлечения математического моделирования. Так же в школе академика В.М.Макарова решались задачи оптимального расположения заправок или сети магазинов на территории. При этом, как правило, входной информацией являются простейшие статистические характеристики ансамбля агентов.

Моделирование принятия решений коллективом агентов. Выборы, оранжевые революции, социальные нестабильности в идеале требуют двух уровней моделирования – микроуровня, относящегося к отдельному субъекту, и макроуровня, на котором рассматривается ансамбль субъектов.

К настоящему моменту построено несколько моделей, описывающих принятие решения или выработку позиции, которые опираются на концепцию клеточных автоматов [6,7].

При таком подходе предполагается, что само принятие решения или определение своей позиции опирается на некоторый коллективный процесс, который может быть описан клеточным автоматом.

Новым элементом в таких системах является элемент случайности. Например, на одну из ячеек клеток случайным образом действует некоторый внешний фактор, меняющий её состояние, а далее автомат функционирует по своим исходным правилам. При этом иногда малое случайное воздействие приводит к «лавине переключений», охватывающей большую часть всей системы. Иногда говорят, что такие системы находятся «на кромке хаоса». Их замечательной особенностью являются эффекты самоорганизованной критичности, состоящие в том, что такие системы сами стремятся перейти в «самое неустойчивое состояние» – в критическую точку – в которой возможны лавины любого

масштаба, вплоть до тех, которые охватывают всю систему. По мысли Пера Бака такая метафора отлично описывает процесс мышления, когда в определенных ситуациях малые воздействия, которые системой обычно игнорируются, могут перевести её в другое состояние [6].

В неортодоксальной модели сознания Р. Пенроуз подобные процессы, развертывающиеся на квантовом уровне (так называемая объективная редукция) приобретают фундаментальное значение [8]. Однако и там ответ вырабатывается в результате взаимодействия элементарных сущностей.

После «выработки решения» на микроуровне вновь, уже на макроуровне происходит взаимодействия и формируется коллективный ответ на вызов, с которым столкнулся рассматриваемый ансамбль. Именно такие модели позволяют описывать и предвидеть социальные нестабильности, оранжевые революции, парадоксальную реакцию отдельных сообществ и общества в целом на поступающую информацию. Именно здесь, на уровне взаимодействия возникают необычные ситуации, когда, каждым по отдельности «против», а все вместе «за».

Принятие решений и дискретная оптимизация. Теория принятия решений представляет собой хорошо разработанный и очень важный раздел прикладной математики, имеющий большое прикладное значение. Основы современной теории управления и вариационного исчисления закладывались еще в XVIII веке Леонардом Эйлером. Большинство космических полетов были бы невозможны без решения достаточно сложных задач оптимального управления.

Не менее важную роль оптимизация, своеобразное «дискретное вариационное исчисление» играет и в рассматриваемом «дискретном мире». Здесь нет уже «бесконечно малых вариаций» рассматриваемых траекторий, а есть тем или иным способом организованный перебор с целью найти наилучший, исходя из заданных критериев, вариант. Типичный пример, показывающий и сложности, и возможности решения этого класса задач, дает проблема планирования космических миссий. В частности, следует выяснить, стоит ли строить сверхтяжелую ракету для полета на Марс или Луну с соответствующим космодромом или проще запустить 4 небольших корабля с тем, чтобы собирать то, что полетит дальше, на околоземной орбите. Какие приборы следует взять, чтобы миссия была выполнена наиболее эффективно при учете весьма вероятных отказов аппаратуры. Здесь речь идет не о «малых вариациях», а о принципиальном изменении схемы проекта. Априорной информацией для решения подобных задач могут служить проекты уже состоявшихся миссий и уже просчитанные варианты, которые представляются разработчикам наиболее перспективными.

При этом нужны человеко-машинные системы и графические редакторы, которые помогают наглядно представить рассматриваемые варианты, оценить в режиме реального времени количественные характеристики миссий и связанные с ними риски. При этом компьютеру может быть поручена и оптимизация выбранного варианта, улучшение характеристик миссии.

Известно, что самыми дорогими ошибками являются стратегические, которые обычно принимаются на начальном этапе проекта. Дискретные системы планирования и оптимизации проектов, подобные описанным в [9] могут помочь избежать таких ошибок не только в космической сфере, но и в других отраслях, гибко учесть «человеческий фактор», зачастую определяющий стоимость, сроки, а иногда и принципиальную реализуемость проекта.

На региональном уровне очень важна схема освоения территории. К примеру, следует знать, где стоило бы строить новую магистраль или населенный пункт, чтобы он усиливал и развивал существующую систему, а не был для нее обузой. Интересно, как в результате самоорганизации будут возникать населенные пункты, если не прикладывать специальных усилий. Полезно представлять, насколько самодостаточна сложившаяся транспортная система, и какое ее развитие будет наиболее эффективным. Эти задачи также могут быть решены на основе итерационных алгоритмов дискретной оптимизации [10].

Подводя итог, можно сказать, что происходящая гуманитарно-технологическая революция ставит новые задачи, связанная с ней компьютерная реальность заставляет искать новый «дискретный» математический язык, основы которого сейчас закладываются.

КОГНИТИВНЫЕ ЦЕНТРЫ РАЗВИТИЯ

Различным стадиям развития общества соответствует разный уровень разнообразия и централизации управления. В индустриальную эпоху в плановой экономике, к примеру, министр «владел информацией» не только о всех металлургических заводах страны, но и об имеющихся домнах, прокатных станах, о наиболее важных заказах и мог «расширять» узкие места, обеспечивать выполнение плана, взаимодействуя с поставщиками, транспортниками, смежниками.

При переходе от индустриальной фазы к постиндустриальной фазе развития, который совершают ведущие страны, это становится невозможным.

Во-первых, стремительно возрастает разнообразие – крупные компании имеют десятки тысяч поставщиков и многие тысячи вендо-

ров на нескольких континентах. Поэтому один руководитель не может и не должен держать всё это в голове.

Во-вторых, различные отрасли и регионы оказываются тесно связаны, поэтому отраслевые и региональные схемы управления всё чаще используются в комплексе с другими управленческими парадигмами.

В-третьих, многие ответственные решения приходится принимать в «быстром времени», что выходит за пределы возможностей одного человека и требует усилий команды компетентных единомышленников.

В-четвертых, очень высокий темп перемен, предложений, инноваций, изобретений, новых рисков и возможностей заставляет работать системы управления с гораздо большими, чем раньше информационными потоками.

В-пятых, гуманитарно-технологическая революция делает важнейшим ресурсом творческий потенциал компетентных профессионалов, вовлеченных в проект, их идеи и инициативу. Привлечение таких становится важнейшей сферой конкуренции цивилизаций, государств, компаний.

Ответ на этот управленческий вызов меняется каждое десятилетие.

В 1970-х гг. многие возникшие проблемы удалось решить благодаря созданию ситуационных центров. В них в критических ситуациях, требующих оперативного управления, заранее сформированный штаб компании или государственной структуры устраивал мозговой штурм. Компьютерная техника использовалась в основном для того, чтобы представлять имеющуюся информацию лицам, принимающим решения (ЛПР) в наглядном и доступном для осмысления виде... Каналы связи использовались, чтобы как можно быстрее и точнее доводить решения до исполнителей и оперативно отслеживать изменения состояния объекта управления [11].

Следующий этап, на который ряд структур готов был перейти с 1990-х гг., связан с децентрализованным управлением, с формированием системы ситуационных центров. Такая система позволяет, с одной стороны, работать с гораздо большими объемами информации и ресурсов, а с другой решать более масштабные задачи.

В отличие от обычных ситуационных центров важнейшей частью когнитивных центров становятся математические модели объектов управления. Эти модели позволяют предвидеть наиболее вероятную реакцию данного объекта управления и других, связанных с ним, на управляющие воздействия. Очевидно, большинство таких моделей, описывающих человекомерные системы, будут дискретными.

Первые попытки построить такие инструменты привели к так называемым когнитивным моделям. Они представляли собой графы,

вершинам которого соответствовали объекты или факторы, а ребрам – причинно-следственные связи. Воздействуя соответствует импульс, запускаемой по этому ориентированному графу, а реакции – импульсы в других вершинах. Как правило, новый класс задач, связанных с основанием интересов, взаимодействующих структур. Расширение технических возможностей, рост масштабов задач привел к тому, что количество перешло в качество, социогуманитарные аспекты управления на новом уровне приобрели решающее значение. На этом уровне сотрудничество становится важнее конкуренции, а расширение пространства возможностей более значимо, чем локальные выгоды взаимодействующих субъектов [12]. Такие модели позволяют ответить на вопрос, улучшит или ухудшит ситуацию данное воздействие [13]. Несмотря на простоту и наглядность таких моделей, как правило, хочется узнать, насколько это улучшит или ухудшит ситуацию. Возможно ли это сейчас?

Следующий уровень, выход на который возможен и желателен в ближайшие годы, связан с когнитивными центрами и сетью таковых. Напомним, что когнитивные науки исследуют процессы мышления, восприятия, феномен сознания. Именно здесь воплощается мечта создателей синергетики об управлении на основе знания.

Развитие теории нейронных сетей и появляющиеся возможности работы с большими данными позволит дать положительный ответ. В самом деле, в основе нейронных сетей лежит возможность настраивать связи между искусственными нейронами на основе обучающей выборки [14]. При наличии социальных сетей, больших данных, контент-анализа интернет-трафика появляется возможность быстро и гибко настраивать математические модели.

Кроме того, появляется возможность, используя ряд алгоритмов, пришедших из области прогноза землетрясений, предвидеть кризисные ситуации, бедствия, катастрофы, социальные нестабильности, волны преступности.

Современные возможности телекоммуникации позволяют собрать в чрезвычайных ситуациях совет экспертов, независимо от того, где физически находятся участники этого совета.

И здесь вновь количество переходит в качество – возросшие технические возможности позволяют использовать взаимодействующие когнитивные центры, чтобы ответить ещё на один вызов, связанный со стратегическим планированием в «долгом времени».

В самом деле, в настоящее время в России принят Закон о стратегическом планировании и подготовлено около 100 различных стратегий федерального уровня. В процесс стратегического планирования

вовлечены многие органы власти вплоть до муниципалитетов. Стратегии эти не согласованы и не увязаны друг с другом. Чиновники получают ежедневно более сотни документов, связанных со стратегическим планированием, и успевают только проверить их соответствие заданному шаблону, используя системы с элементами искусственного интеллекта. Важную и конструктивную идею стратегического планирования захлестнул вал бумаг, которые в массе своей невозможно прочесть, осмыслить и использовать.

Когнитивные центры позволяют организовать на содержательном уровне работу по проектированию будущего, а, используя компьютерные возможности, организовать согласование федеральных и региональных стратегий друг с другом и между собой. При этом, как показывает опыт, происходит самоорганизация – формируется ядро активных, компетентных, ответственных людей, которые готовы заниматься своими текущими делами, но могут и хотят заглядывать в будущее.

В результате этой работы формируется субъект развития, формируется новое поколение элиты, ориентированное на вызовы завтрашнего дня. Организация в таких структурах и административные инструменты дополняются самоорганизацией и творческой инициативой.

В качестве примера такой постановки дела можно привести организацию стратегического планирования в Японии.

При этом на первый план выходят технологии (включая социогуманитарные), образование и наука – сферы деятельности, расширяющие пространство возможностей и ориентированные на будущее. Поэтому для когнитивных центров развития, по крайней мере, на начальном этапе важны именно эти области.

В основе каждой технологии лежат научные достижения. В силу междисциплинарности проблем управления все обсуждаемые парадигмы и перспективы в той или иной мере опираются на представления кибернетики. Автоматизация и внедрение автоматизированных систем управления (АСУ). Эти работы 1950-80 гг. опирались на классическую винеровскую теорию управления и связи в природе, человеке и обществе (кибернетика первого порядка). На следующем этапе была сделана попытка ввести содержательно человека в эти теоретические построения, описав формирование и воздействие субъектов (кибернетика второго рода).

Наконец, система когнитивных центров развития опирается на теорию саморазвивающихся инновационных сред, постнеклассическую теорию управления, теорию самоорганизации (синергетику). Профессор В.Е.Лепский, активно развивающий с коллегами все эти подходы назвал этот комплекс идей и исследований кибернетикой третьего порядка.

Есть ли возможности, чтобы когнитивные центры, центры развития стали основой системы управления, которая сможет обеспечить новую индустриализацию России?

Исторический опыт показывает, что при этом не следует ломать старую (Известный принцип С.П.Королёва: «Не тронь, пока работает»). Надо выращивать новое и открывать новые области деятельности, в которых сегодня рождается будущее.

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ЗАВОДОВ И ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ

Стоит кратко сказать о синергетическом эффекте, который может возникнуть при совместном использовании когнитивных центров, дискретных математических моделей и технологий, которые сейчас часто связывают с системным проектом построения «Индустрия 4.0» (который активно развивается сейчас в Германии). Эти технологии – построение цифровых двойников предприятий и развитие интернета вещей.

Любые значимые технологии имеют обратную сторону, – их можно использовать и во благо, и совсем в других целях. В частности, как показал анализ проекта Давосского экономического форума «Четвертая промышленная революция», представленный основателем этого форума Клаусом Швабом [16].

Этот проект не имеет отношения к сфере производства и в большой степени не является экономическим [17]. Это проект построения жесткого социального управления.

В то же время широкое использование компьютеров в производстве – построение цифровых двойников предприятий – позволяет избавить людей от рутинной умственной работы: «Данные от датчиков, установленных на станках (обычных или с числовым программным управлением, ЧПУ), собирают в большие данные (big data), которые потом анализируются при помощи специального программного обеспечения. На основе этих данных формируются математические модели реальных единиц оборудования и технопроцессов – их сейчас принято называть цифровыми двойниками (или цифровыми эталонными моделями). Далее может быть смоделирован процесс изготовления определенного изделия с заданными характеристиками и свойствами» [18]. Эта технология развивается более полувека, однако сейчас появилась возможность от отдельных единиц оборудования переходить к мониторингу и описанию больших систем.

Этому способствует и развитие интернета вещей [19]. По оценке Шваба, к 2025 г. в различных системах будет установлено более \$1 трлн датчиков. При разумном использовании этих возможностей в

когнитивных центрах может осуществляться мониторинг опасных объектов (которых в России более 50 000), грузов, материальных и финансовых потоков. Часть этой информации в обобщенном, агрегированном виде может использоваться в когнитивных центрах, на информационном уровне связывая субъект и объект управления.

Однако мало иметь большие возможности. Надо иметь волю, желание и настойчивость, чтобы ими разумно воспользоваться.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект 18-01-00619 «Разработка новых математических методов и междисциплинарных подходов для анализа ряда социогуманитарных проблем»), совместным грантом РФФИ и БРФФИ (проект 16-01-00342, Г18Р-191 «Междисциплинарный анализ путей развития и перспектив цифрового общества»), а также программой фундаментальных исследований президиума РАН «Научные основы развития российского научно-инновационного комплекса в контексте глобальных трансформаций» (проект 3.2 «Разработка фундаментальных основ прогнозирования, экспертизы и поддержки принятия управленческих решений в научно-инновационном комплексе России на базе информационного и компьютерного моделирования и когнитивных центров»).

Литература

1. Иванов В.В., Малинецкий Г.Г. Россия XXI век. Стратегия прорыва. Технологии. Образование. Наука. Изд. 3-е. – М.: ЛЕНАНД, 2018. – 304с. – (Будущая Россия № 26).

2. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. Изд. 2-е. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 288с.

3. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 484с.

4. Майнцер К. Сложносистемное мышление. Материя, разум, человечество. Новый синтез – М.: Книжный дом «Либроком», 2009, – 464с. – (Синергетика: от прошлого к будущему).

5. Малинецкий Г.Г., Бурцев М.С., Науменко С.А., Подлазов А.В. Происхождение и развитие жизни с точки зрения синергетики // Будущее прикладной математики: Лекции для молодых исследователей. От идей к технологиям / под ред. Г.Г. Малинецкого. – М.: КомКнига, 2008. – 512 с.

6. Бак П. Как работает природа. Теория самоорганизованной критичности. М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2019. – 376с. – (Синергетика: от прошлого к будущему).

7. Колесников А.В. Инжиниринг сложных социальных систем в цифровом мире / Проектирование будущего. Проблемы цифровой

реальности (8-9 февраля, 2018г., г. Москва). – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018, с. 81-88.

8. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. Изд. 4-е. – М.: УРСС. Издательство ЛКИ, 2011. – 400с. (Синергетика: от прошлого к будущему).

9. Зухба Р.Д., Куракин П.В., Малинецкий Г.Г. и др. система моделирования «КОСИОН» как инструмент принятия решений в космической отрасли // Препринты ИМП им. М.В. Келдыша. – 2015. №113 – 36с., URL [http:// library.keldysh.ru/preprint/asp/id=2015-113/](http://library.keldysh.ru/preprint/asp/id=2015-113/)

10. Степанцов М.Е. Моделирование развития транспортных систем в условиях самоорганизации транспортных потоков / Горизонты синергетики: Структуры, хаос, режимы с обострением / Под ред. Г.Г. Малинецкого. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 464с. (Синергетика: от прошлого к будущему №89).

11. Бир С. Мозг фирмы. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 416с.

12. Социогуманитарные аспекты ситуационных центров развития. Под ред. В.Е. Лепского, А.Н. Райкова. – М.: Когнито-Центр, 2017. – 416с.

13. Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Малинецкий Г.Г. и др. Управление риском. Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. – М.: Наука, 2000. 431с. – (Серия «Кибернетика: неограниченные возможности и возможные ограничения»).

14. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б., Подлазов А.В. Нелинейная динамика: Подходы, результаты, надежды. – М.: КомКнига, 2006. – 280с. (Синергетика: от прошлого к будущему).

15. Новое в синергетике. Новая реальность, новые проблемы, новое поколение. / Под ред. Г.Г. Малинецкого. – М.: Наука, 2007. – 383с. – (Информатика: неограниченные возможности и возможные ограничения»).

16. Шваб К. Четвертая промышленная революция. – М.: Издательство «Э», 2017. – 204с. – (Top Business Awards).

17. Контуры цифровой реальности. Гуманитарно-технологическая революция и выбор будущего. / Под. Ред. В.В. Иванова, Г.Г. Малинецкого, С.Н. Сиренко. – М.: ЛЕНАНД, 2008. – 344с. (Будущая Россия №28).

18. Колерова В. Цифровое раздвоение заводов ещё впереди // Эксперт, 2018, №44, с. 24-26.

19. Грингард С. Интернет вещей: Будущее уже здесь. – М.: Издательская группа «Точка», 2017, – 224с.