

УДК 519.876

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕКУЩЕГО ФИНАНСОВОГО КРИЗИСА

Г. Ржевский

*Complexity Science and Design, the Open University,
Walton Hall, Milton Keynes, MK7 6AA, UK
Emergent Intelligence Technology, Inc.,
1431, Riverplace Blvd. Ste., 3205, Jacksonville, FL, USA
E-mail: Rzevski@gmail.com*

Эксперименты с мультиагентными программными системами большой размерности позволяют изучить факторы, влияющие на способность сложных систем сохранять свою целостность при функционировании в условиях, близких к хаосу. Результаты исследования обобщены и использованы при анализе причин сбоя мировой финансовой системы.

Ключевые слова: сложные системы, самоорганизация, эволюция, адаптация, инструменты агентного моделирования, глобальный финансовый кризис.

Введение. Глобальная экономика, использующая сеть Интернет, включает в себя огромное и постоянно растущее число активно взаимодействующих Агентов (поставщиков, клиентов, инвесторов, кредиторов, заёмщиков и посредников) и обладает всеми характеристиками сложных систем:

- поведение системы подчиняется предписанным правилам или шаблонам при отсутствии централизованного управления;
- поведение системы определяется посредством локальных взаимодействий Агентов и не поддаётся прогнозированию;
- вследствие частых возмущений система испытывает нехватку времени для возвращения в состояние равновесия, при этом бóльшую часть времени её состояние может быть охарактеризовано как «далёкое от равновесия» или «близкое к хаосу»;
- наличие нелинейностей в системе может вызывать усиление малого возмущения, что, в свою очередь, приводит к значительным нарушениям, известным как эффект «Чёрного лебедя»^{*} или «эффект бабочки»;
- система способна к автономной самоорганизации и поэтому обладает свойствами адаптивности и гибкости;
- система эволюционирует одновременно со своей средой, а произошедшие в ней изменения являются необратимыми;
- составляющие систему Агенты по аналогии с социальными системами имеют декларлируемые и недеklarлируемые задачи и предрасположенность к выполнению этих задач в условиях конкуренции или кооперации с другими Агентами.

Основной проблемой является непрогнозируемость глобального поведения системы. Например, зная, что в системе проявляется периодическое увеличение или уменьшение объёма производства, мы не можем предсказать ни моменты времени, ни степень очередного изменения этой величины.

^{*}Эффектом «Чёрного лебедя» в экономике принято называть крайне редкое явление, которое, во-первых, невозможно предсказать, а, во-вторых, при его наступлении становится невозможным прогнозирование дальнейшего развития ситуации. Последствия этого явления, как правило, катастрофичны. Термин апеллирует к ситуации с открытием настоящего чёрного лебедя: до того, как в Австралии был обнаружен первый чёрный лебедь, считалось, что лебеди бывают только белыми. (*Примеч. ред.*)

Мировая финансовая система является подсистемой мировой экономики и обладает всеми свойствами родительской системы.

В данной работе идеи и методы теории сложных систем применены к анализу мировой финансовой системы и предложены способы идентификации факторов, определяющих глубину текущего экономического спада.

В первую очередь анализируется эффект влияния структурных факторов глобальной финансовой сети на её поведение с учётом таких характеристик, как скорость взаимодействия Агентов, количество связей между Агентами, адекватность правил поведения, налагаемых на процессы принятия решений Агентами, и достоверность социальных представлений в процессе взаимодействия Агентов.

Метод исследования. В данной работе представлены результаты, полученные посредством наблюдения и анализа поведения сложных программных систем высокой размерности, разработанных автором и его сотрудниками для бизнес-клиентов и находящихся в настоящее время в коммерческом использовании, а также экстраполяции наблюдаемых свойств на мировую финансовую систему. По этой причине результаты носят умозрительный характер и, вероятно, требуют тщательной проверки с помощью широкомасштабных модельных экспериментов.

Сложные системы — глобальная экономика, национальная экономика, экология, рои пчёл, человек, человеческое общество, культура, климат, движение транспорта, группы программных агентов и жизненный цикл летательных аппаратов или автомобилей.

Примерами сложных систем, способностью к быстрой самоорганизации которых обеспечивается значительную устойчивость к интенсивным внешним воздействиям, являются: эпидемии, иммунная система человека, террористические сети и сеть Интернет.

Общим для всех вышеперечисленных систем является отсутствие централизованного управления — поведение есть результат взаимодействия компонентов системы между собой и с окружающей средой. Полномочия Агента по принятию решения могут быть разными, но, как правило, Агенты обладают автономностью, ограниченной только предписанными правилами поведения; они не действуют по точным (алгоритмическим) инструкциям. Глобальное поведение таких систем невозможно предсказать.

Сложность и детерминизм. Существуют две противоположные философские концепции устройства Вселенной.

Первая заключается в утверждении, что строение мира основано на «великом замысле», и поэтому поведение мира предсказуемо (детерминировано). Любая неопределённость свидетельствует лишь о нашей неспособности понять мир, и для уменьшения неопределённости мы должны открывать новые законы природы. Великие философы и учёные придерживались такого взгляда, включая Аристотеля, Канта, Ньютона и Эйнштейна.

Вторая концепция гласит, что Вселенная непредсказуема (сложна), поскольку временная эволюция связана с автокаталитическими и саморазвивающимися свойствами отдельных её элементов. Эволюция мира необратима и приводит к увеличению его сложности. Пригожин в работах [1, 2] писал, что будущее не определено и находится в состоянии непрерывного конструирования. Подобного взгляда на мир придерживались Будда, Дарвин, Поппер.

В период великих открытий ньютоновской науки идея детерминистского мира была очень популярной. В настоящее время мы вынуждены потрясёнными сложностью окружающей среды, в которой живём и работаем, и динамика изменений такова, что высказывание «в одну и ту же реку нельзя войти дважды» является очень верным. В данных обстоятельствах идея непрерывного развития окружающего мира, определяемого взаимодействием составляющих его компонентов, кажется весьма правдоподобной [3].

Эволюция порождает сложность. Интересными вопросами являются следующие: каково происхождение сложности? почему сейчас возникает так много сложных задач?

Существует неоспоримое доказательство того, что по мере эволюционирования нашей Вселенной экологическая, социальная, политическая, культурная и экономическая среда, в которой мы живём и работаем, усложняется. Этот процесс необратим и с очевидностью проявляется в большом разнообразии возникающих структур, процессов и растущей неопределённости конечного результата.

Общество эволюционирует одновременно с технологиями создания материальных благ. Сельскохозяйственное общество, для которого основным ресурсом была *Земля* и большая часть людей занималась сельским хозяйством, сменилось Индустриальным обществом, где главный ресурс — *Капитал*, а большинство людей вовлечено в производство товаров. Сейчас осуществляется переход от Индустриального к Информационному обществу, в котором ключевым ресурсом является *Информация*, и зачастую в информационной сфере услуг (переработке информации) занято людей больше, чем в производстве товаров.

Переход к Информационному обществу характеризуется прежде всего резким увеличением сложности из-за глобализации, вызванной: а) стремительным распространением сети Интернет, б) существенно возросшими возможностями (и уменьшением стоимости) движения товаров и услуг на мировом рынке и в) согласованными действиями по уменьшению тарифов и освоению инструментов, упрощающих международный обмен товарами и услугами.

Таким образом, сложность рынков увеличивается с каждым новым этапом эволюции общества (см. таблицу).

Смена системы представлений, обусловленная переходом к Информационному обществу. *Возникновение глобальной экономики.* В социально-экономической сфере очень важным является переход от национальных промышленных рынков к глобальной экономике благодаря отмене таможенных сборов и стремительному развитию сети Интернет. Глобальная экономика складывается из огромного количества поставщиков и клиентов, наскоро определяющих условия сотрудничества, а затем так же быстро меняющих их в случае появления более выгодных возможностей; каждый субъект рынка стремится к получению наибольшей экономической выгоды. Мировой рынок обладает всеми характеристиками очень сложной системы [4]. Распределение ресурсов в соответствии со спросом в мировом масштабе происходит в результате отдельных транзакций между субъектами рынка. Глобализация увеличивает количество материальных благ на всех рынках (по выражению экономистов, «прилив глобализации поднимает все корабли»). Данные статистики за последние 30 лет показывают, что мир в целом испытывал беспрецедентный экономический рост, сопровождавшийся одним недостатком: разрыв между состоятельными и необеспеченными слоями населения увеличивался во всех странах, кроме Ирландии.

Постоянно растущие число игроков на мировом рынке и скорость информационного обмена в сети Интернет ускорили динамику рынка до такой степени, что возможностей современного поколения информационных систем, поддерживающих бизнес-процессы, не достаточно.

Проиллюстрируем данное утверждение примером проблем, связанных с мировыми системами поставок потребительских товаров, где задействовано большое число продавцов,

Тип общества	Главный ресурс	Распределительная сеть	Масштаб
Сельскохозяйственное	Земля	Дороги местного назначения	Местный
Индустриальное	Капитал	Автомагистрали, Железные дороги	Национальный
Информационное	Информация	Сеть Интернет	Мировой

складов, логистиков, сборочных заводов и розничных торговцев во всём мире, совместно использующих огромное количество ресурсов, таких как машинное оборудование, роботы, конвейеры, погрузочные платформы, грузовики, товарные поезда, грузовые самолёты и корабли, и взаимодействующих с сотнями рабочих, грузчиков, операторов, диспетчеров и администраторов. Оказывается, что подобные системы поставок трудно поддаются управлению существующими системами планирования бизнес-ресурсов, распределения и оптимизации из-за высокой частоты и непредсказуемости таких событий, как поступление новых и отмена сформированных заказов, изменения в уже сформированных заказах и схемах распределения, ошибки снабженческих организаций и человеческий фактор. Основная проблема состоит в том, что частота изменений на рынке составляет, как правило, 1–2 ч, тогда как на перепланирование работы завода требуется не меньше 8–10 ч; в международной логистике перенаправить продукт, переданный по трубопроводу, можно только после того, как он достигнет первоначально заданного пункта назначения, а доставка может занимать несколько дней.

Нужно согласиться с тем, что сложность — это норма. Попытки внести упрощения в сложные алгоритмы, которые являлись важным и полезным аспектом управленческой и технологической философии в промышленном обществе с намного менее сложной структурой рынков, в настоящее время вредны.

Необходимо использовать сложность рынков — она предоставляет большие возможности для тех, кто совершенствует свой образ мышления, навыки и средства для достижения большей гибкости и устойчивости к внешним воздействиям.

Переход от производственных к информационным услугам. Перенос производства в развивающиеся страны — неотъемлемая часть глобализации. Замена производства информационными услугами в качестве основного вида деятельности, приносящего прибыль, может состояться только в странах с развитым сектором ИТ и большим количеством высококвалифицированных работников умственного труда: исследователей, конструкторов и руководителей в сфере финансовых услуг, ИТ, проектирования, консалтинга, средств массовой информации, строительства, архитектуры, развлечений и т. д. Быстрое развитие информационных услуг предоставляет широкие возможности для экономического процветания, в то время как страны, ориентированные на производство, сталкиваются с жёсткой конкуренцией.

Однако развитая сфера информационных услуг предполагает наличие систем разработки и хранения информации, обеспечивающих её доступность и применимость. Современное состояние сферы информационных технологий не отвечает этим требованиям.

Возникновение цифровой развлекательной индустрии и социальных веб-сайтов. В настоящее время переход от печатных и аналоговых средств массовой информации к средствам, основанным на цифровом представлении информации, стал возможен благодаря значительному прогрессу в производстве миниатюрных и эффективных процессоров и чипов памяти, средств передачи данных и прикладного программного обеспечения, в стремительном распространении многоканального цифрового телевидения, цифровых камер, сотовых телефонов и цифровых аудио- и видеоустройств. Также быстро растёт количество веб-сайтов, обеспечивающих передачу пользователю и приём от него графических, музыкальных и мультимедиа-продуктов. Устройства iPod и iTunes компании "Apple", ресурсы YouTube и My Gallery являются основными представителями этой технической революции. Увеличение количества так называемых социальных веб-сайтов, где люди демонстрируют результаты своего творчества широкой аудитории, — это показательное явление, которое, очевидно, будет популярно и во второй половине этого столетия.

Переход от использования корпоративных носителей информации к новым носителям в сети Интернет имел неожиданные последствия, среди которых, и не в последнюю очередь,

такие явления, как «длинный хвост»^{*} [5], «мудрость толпы» [6] и «экономика внимания» [7].

Индивидуальная глобализация. Сегодня стало возможным с помощью специальных сайтов поручать сторонним исполнителям решение многих личных задач: поиск партнёров для встреч, делопроизводство, разработку веб-сайтов, частные уроки математики для школьников, художественное оформление бракосочетаний и т. д. Такой подход позволяет более эффективно расходовать средства, например: услуги выпускника университета в Индии стоят 15 долл. в час по сравнению с 60 долл. в США, оплата преподавателя математики, находящегося в Бангалоре, составляет 99 долл. в месяц, художественное оформление бракосочетания в Аргентине стоит 65 долл. Данный подход также способствует уменьшению неравномерной занятости работников интеллектуального труда по всему миру, обеспечивая удалённой работой специалистов из развивающихся стран.

Суперсжатие. По мере непрерывного увеличения компьютерных ресурсов для хранения информации и возможностей сети Интернет по обмену данными появилась тенденция к улучшению интуитивных решений экспертов за счёт экстенсивной обработки данных, направленной на выделение в них полезных шаблонов, что позволяет использовать компьютеры для получения Знаний — ключевого ресурса Информационного общества. Суперсжатие интенсивно используется в маркетинге, ориентированном на индивидуальных потребителей, а также в нетрадиционных областях, таких как тренировки футболистов, медицинская диагностика и обучение — нахождение методик обучения для каждого конкретного индивидуума.

Угроза новых видов неблагоприятного воздействия. Одновременно с глобализацией, быстрым ростом количества людей, использующих сеть Интернет и/или путешествующих по миру, возникли новые виды сложных глобальных систем: террористические организации, эпидемии, массовые хакерские атаки, Интернет-мошенничество и рассылка спама.

Неэффективность очень больших систем. Вследствие жёсткой организации очень большие системы не удовлетворяют условиям непрерывных структурных преобразований и не способны адаптироваться к быстрым изменениям окружающей среды. В Великобритании существует множество примеров таких систем:

— Очень большие общеобразовательные школы с количеством учащихся от 1500 до 2000 человек находятся на последнем месте по поведению и успеваемости (по данным благотворительной организации Human Scale Education). Наоборот, школы малого размера обеспечивают благоприятную воспитательную среду и, следовательно, хорошую успеваемость учащихся.

— Крупные частные компании, как правило, приносят меньшую прибыль, чем компании малых и средних размеров.

— В очень больших компьютерных системах, включая национальную службу здравоохранения, системы управления скорой медицинской помощью и движением воздушного транспорта, налоговую службу и систему учёта водительских прав, возникают частые временные задержки, превышение бюджета и в некоторых случаях не обеспечивается ожидаемая производительность системы.

— На фоне трудностей, испытываемых крупными авиакомпаниями, небольшие и высокоэффективные 3–4-местные реактивные самолёты иницируют революционный процесс в авиации, подталкивая к появлению большого числа компаний, предлагающих услуги региональных воздушных такси.

^{*} «Длинный хвост» (The Long Tail) — устоявшийся термин, пришедший из статистики и экономики. Впервые он был использован в 2004 г. Крисом Андерсоном в статье журнала "Wired", в которой отмечено: для многих новых экономик характерно существенное влияние продаж специфичных нишевых продуктов, причём прибыль от их реализации сопоставима с выручкой от продаж бестселлеров. (*Примеч. ред.*)

Пользователи Семантической паутины. Следующей научно-технической революцией будет переход от сети Интернет, работающей с потоками данных, к новой Семантической паутине, способной «воспринимать» смысл, содержащийся в данных. Семантическая паутина является ранней идеей исследователей в области вычислительной техники и в настоящее время реализуется с помощью передовых программных продуктов, разработанных на основе онтологий и мультиагентных программных систем, применяемых и тестируемых в коммерческих приложениях. Дальнейшее развитие подобных систем обеспечивается совместными усилиями большого числа исследователей из Европы и США.

Функциональность, необходимая для использования Семантической паутины, существенно отличается от возможностей сегодняшнего программного обеспечения. Выделение семантического смысла в предложениях естественного языка предполагает выполнение интеллектуальных вычислительных действий в отличие от грубой обработки данных, осуществляемой сегодняшним программным обеспечением. Все успешные на данный момент прототипы Семантической паутины основаны на онтологиях и мультиагентных технологиях.

Вычисления в «Облаке». Информационные технологии постоянно изменяются в целях объединения в глобальную сеть всех устройств цифровой обработки данных и информационного контента — Облако.

Существует тенденция к хранению данных на серверах, расположенных на больших и хорошо защищённых «серверных фермах» по всему миру, а также к осуществлению доступа к этим серверам из любой точки земного шара.

Наш информационный мир стремительно растёт, увеличиваясь в размерах приблизительно вдвое каждые два года. В 2008 г. его размеры можно было охарактеризовать следующими величинами: 100 миллиардов кликов в день, 4 миллиарда цифровых устройств (компьютеры, телефоны, устройства RFID (Radio Frequency IDentification — радиочастотная идентификация) и т. д.), подключённых к сети Интернет (что превышает число нейронов в мозге человека), 55 триллионов ссылок между веб-страницами (что приблизительно равно числу синапсов в мозге человека), 2 миллиона сообщений электронной почты в секунду, 8 терабайт сетевого трафика в секунду, 65 миллиардов телефонных звонков в год, 600 миллиардов устройств RFID, находящихся в пользовании.

Предполагается, что к 2030 г. все компьютеры, персональные органайзеры, телефоны, устройства iPod, TV, проигрыватели DVD, модемы, радиоприёмники, медиа-проекторы, видеомэгафоны, hi-fi-центры, а также весь контент этих устройств, т. е. буквенно-цифровые данные, тексты, фильмы, видео-, теле- и радиопередачи, газеты, книги, музыка, сообщения электронной почты, блоги, веб-сайты и журналы, будут соединены в глобальную сеть — Облако.

Более того, очень большое число природных и искусственных объектов (домашний скот, самолёты, поезда, транспортные средства, устройства и машины любого назначения) будут связаны посредством устройств RFID в так называемую сеть Интернет-Вещей, являющуюся частью Облака.

Аналогичным образом будут взаимодействовать люди посредством использования платёжных карт, «умной» одежды, КПК-часов и т. п.

Идея вычислений в Облаке подразумевает полную взаимосвязь всех производителей, обработчиков и потребителей информации.

В настоящее время существуют Облака небольших размеров, управляемые, например, Google, Apple, IBM, Microsoft и т. д., которые постепенно будут объединяться в глобальную сеть Облако.

Чёрные лебеди. Существенные нелинейности, являющиеся неотъемлемым свойством сложных систем, могут вызывать усиление малого возмущения и приводить к значительным разрушениям в системе, называемым *Чёрные лебеди* [8]. Наиболее впечатляю-

шим примером такого эффекта является цунами. По мере увеличения сложности мировой Интернет-экономики в некоторые моменты времени можно ожидать возникновения непредвиденных разрушительных событий, что подтверждается кризисом мировой экономики в настоящее время. Этот эффект — обратная сторона сложности, и в данный момент практически невозможно повлиять на возникновение эффекта *Чёрный лебедь*. Что мы можем сделать — это проектировать информационные сети таким образом, чтобы минимизировать распространение и развитие неустойчивости, и разрабатывать адаптивные и гибкие социотехнические системы. Дополнительное обсуждение этой темы будет проведено далее.

Использование понятий и методов теории сложных систем для решения сложных задач.

Утверждение. Сложные задачи могут быть изучены только с помощью моделей, близких по сложности к моделируемым проблемам.

Исключая термин «близкие», можно аргументировать данное утверждение следующим образом: сложная задача изменяет своё состояние во время моделирования, поэтому модель должна обладать способностью адаптации к этим изменениям; адаптация должна носить автономный характер (проходить при отсутствии инструкций от разработчика), что возможно при самоорганизации и интеллектуальном поведении модели. Другими словами, *модель должна обладать способностью изменяться вместе с моделируемой задачей.*

Ключевым следствием данного утверждения является невозможность использования традиционных компьютерных программ для моделирования сложных задач по причине их неадаптивности. Такие программы не могут изменяться самостоятельно — изменение осуществляется с помощью инструкций программиста. В настоящее время только мультиагентные программные технологии обеспечивают способность программ к адаптации.

Два вида сложных задач. Сложность некоторых нерешённых и важных проблем (всемирное потепление, бедность и рост народонаселения) настолько велика, что в лучшем случае можно ожидать лишь построения значительно упрощённых моделей данных задач с тем, чтобы получить некоторое представление о степени их устойчивости к нашим попыткам решения. Далее будем называть подобные задачи Крайне Сложными. Примером выдающейся работы, посвящённой моделированию крайне сложных систем, является работа С. Капицы [9] по изучению роста численности населения планеты.

Кроме того, существует большое число сложных проблем, в которых составляющие компоненты и их взаимодействия могут идентифицироваться и моделироваться путём конструирования Виртуального Мира (модели) практически такой же сложности, как и моделируемый Реальный Мир. Почти все сложные бизнес-задачи, а также социальные, экономические, проблемы безопасности и технологий и задачи развития систем городской инфраструктуры относятся к этой категории [10–12]. Будем в дальнейшем называть эти системы Сложными.

Технология моделирования сложных задач. Эффективное моделирование состоит из нескольких этапов:

1. Сбор и организация знаний о предметной области — о части реального мира, которая подлежит изучению. Наиболее эффективным методом представления знаний сложной предметной области является конструирование графа, в котором вершины и ветви — это Понятия и Отношения между Понятиями предметной области. Например, для описания цепочки поставки товара можно использовать следующие Понятия: *Заказ, Поставщик, Склад, Транспорт, Груз, Дорога и Маршрут*. Каждое Понятие описывается атрибутами и правилами, накладывающими ограничения на его поведение. Такое представление знаний предметной области называется Онтологией [13].

2. Конструирование Виртуального Мира, содержащего сущности Понятий и их Отношений из Онтологии предметной области. Для товарной цепочки Виртуальный Мир будет

графом с вершинами *Заказ O1, Заказ O2, ...; Поставщик S1, Поставщик S2, ...; Груз C1, Груз C2, ...; Транспорт T1, Транспорт T2* и т. д. и связями «*S1 поставляет O1*», «*C1 грузится на T2*» и т. д. Виртуальный Мир, представляющий сложные системы, в частности товарные цепочки больших международных организаций, может содержать миллионы объектов, атрибутов, правил и отношений. Для конструирования Виртуальных Миров таких сложных систем необходимо использовать мощное мультиагентное программное обеспечение [14].

3. Соединение Виртуального Мира с Реальным. Реальный Мир (моделируемая сложная задача) непрерывно изменяется. Эти изменения носят характер появления непредсказуемых событий, например для товарной цепочки: *Появление, Изменение и Отмена Заказа, Закрытие Дороги, Поломка Транспорта* и т. д. О возникновении каждого Реального События следует немедленно информировать Виртуальный Мир, в котором создаётся эквивалентное Виртуальное Событие, вынуждающее соответствующую часть Виртуального Мира адаптироваться к изменениям Реального Мира. Каждое изменение (адаптация) Виртуального Мира должно быть передано Реальному Миру до возникновения следующего Реального События [15].

4. Передача Виртуальному Миру полномочий управления Реальным Миром в режиме реального времени. Агенты (программы небольшого размера) сопоставляются с каждой вершиной графа в Виртуальном Мире в целях обеспечения его целостности. Например, если в Виртуальном Транспорте возникла неисправность, то Агент Транспорта отправляет сообщения всем связанным с ним вершинам графа, сообщая таким образом, что Виртуальный Транспорт прекратил своё функционирование. Данные сообщения вызывают вспышку активности у соответствующих Агентов, пытающихся адаптироваться к этому событию, отыскивая замену Виртуальному Транспорту. Найденное решение передаётся для исполнения Реальному Миру, обеспечивая совместное функционирование двух миров.

5. Исследование поведения Реального Мира с помощью экспериментов в Виртуальном Мире. Сконструированный и реализованный в программном виде Виртуальный Мир может быть использован для моделирования поведения Реального Мира, испытывающего влияние различных условий окружающей среды, например изучения поведения товарной цепочки под влиянием различных условий на рынке.

Примеры решённых сложных задач. Автор и его сотрудники разработали большое количество мультиагентных программных систем для исследования или контроля сложных задач большой размерности, существенная часть которых реализована и постоянно используется. Данные системы подробно представлены в литературе:

1. Система планирования в реальном времени проката автомобилей в Европе для одной из крупнейших в мире компаний [15].

2. Система планирования в реальном времени транспортной логистики для более чем 2000 такси в Лондоне [16].

3. Система планирования в реальном времени морской логистики для флота крупных танкеров (10 % мирового тоннажа), перевозящих сырую нефть [17].

4. Система планирования производственного процесса в реальном времени [18].

5. Система динамического выделения шаблонов для ведущей страховой компании [19].

6. Система семантического анализа и поиска для организации генетических исследований [20].

7. Система моделирования виртуальных организаций [21].

Масштаб решённых проблем и коммерчески успешное применение разработанных систем привлекли внимание Европейского сообщества наук о сложности (European Complexity Science Community), отметившего работы автора как удачный пример использования науки о сложности в прикладной области.

Возможно ли преодоление финансовых кризисов с помощью методов теории сложных систем? Предварительный ответ на данный вопрос — утвердительный.

Финансовые системы являются сложными, и поэтому к ним применим опыт, получаемый при разработке искусственных сложных систем, таких как мультиагентные системы планирования большой размерности.

Ключевой вывод, сделанный на основе десятилетнего опыта решения сложных задач большой размерности, можно сформулировать так: независимо от тщательности разработки сложной системы ожидаемый результат будет получен не сразу. Это является правилом, а не исключением из правила по причине того, что комплексное поведение таких систем определяется взаимодействием входящих в их состав Агентов и, в принципе, непредсказуемо.

Однако всегда возможна настройка поведения разработанной системы путём изменения важных системных параметров. Необходимо устранить распространение возмущений в системе, вызывающих неустойчивость и иногда приводящих к нарушению целостности. Поведение системы, хотя и непредсказуемое в деталях, но никогда не выходящее за ранее определённые границы и быстро восстанавливающееся после воздействия возмущения, является признаком успешной настройки её параметров.

Основные параметры настройки:

- 1) степень автономности Агентов;
- 2) вес, приписываемый Агенту;
- 3) скорость обмена сообщениями между Агентами;
- 4) степень связанности Агентов.

Рассмотрим роль приведённых параметров в настройке системы.

Степень автономности Агентов — возможно, наиболее значимый фактор, определяющий поведение сложной системы. Если на действия Агентов наложены значительные ограничения, то уменьшается сложность, а также адаптивность и устойчивость системы. Компьютерная программа в данном случае характеризуется предопределённым поведением и при изменении ситуации, не предусмотренном разработчиком, останавливается. С другой стороны, если Агенты обладают слишком большой свободой действий, то сложность системы увеличивается и начинает проявляться неустойчивость. Насколько известно автору, не существует теории, способной назначить надлежащую степень свободы. Ещё более важно то, что величина изменения степени свободы Агента должна зависеть от динамики текущей ситуации в системе. В случае очень больших возмущений адекватным решением будет передача Агенту широкой свободы действий для быстрого поиска эффективного способа адаптации, а при меньших возмущениях — ограничение риска неконтролируемых изменений.

Сложность по определению присутствует в ситуациях, когда автономные компоненты взаимодействуют в условиях непредсказуемости. При использовании многоагентного программного обеспечения для моделирования сложных ситуаций каждому автономному компоненту назначается Агент для обмена сообщениями и имитации взаимодействия между компонентами. Исходя из опыта автора для представления ситуации в целом целесообразно назначать дополнительного Агента — Агента Предприятия (Enterprise-Agent). Его задача состоит в том, чтобы ни один Компонентный Агент не получал преимуществ за счёт всей системы. Необходимо подчеркнуть, что Агент Предприятия не инструктирует Компонентных Агентов, а, скорее, участвует в процессе переговоров как равноправный партнёр.

Каждое новое событие, которое изменяет текущее состояние системы, требует определённого периода времени для приспособления системы к новой ситуации, а также для установления связей между Агентами, ответственными за адаптацию. С одной стороны,

слишком высокая скорость транзакций между Агентами может привести к нестабильности, потому что новая волна взаимодействий между Агентами приходит ещё до урегулирования предыдущей ситуации. С другой стороны, слишком низкая скорость может мешать системе достичь равновесия раньше, чем наступит следующая ситуация, требующая урегулирования. Необходима точная настройка скорости транзакций.

В крупных сетях, где все узлы соединены друг с другом, взаимодействия между узлами совершенно не поддаются прогнозированию и часто ведут к чрезвычайным событиям, так называемым *Чёрным лебедям*. Принудительное сокращение взаимосвязей ограничивает приспособляемость системы. Лучшим практическим решением этой проблемы будет разделение сети на области, содержащие компактно расположенные и тесно взаимодействующие узлы, и выборочное соединение этих областей между собой. Правильное разделение сети на области позволит избежать наступления чрезвычайных событий и сократить их количество.

С накоплением опыта по настройке сложных систем стало возможным определить общие принципы работы со сложными системами, которые сформулированы далее. Разумное применение этих принципов на начальных этапах проектирования сокращает необходимость в настройке.

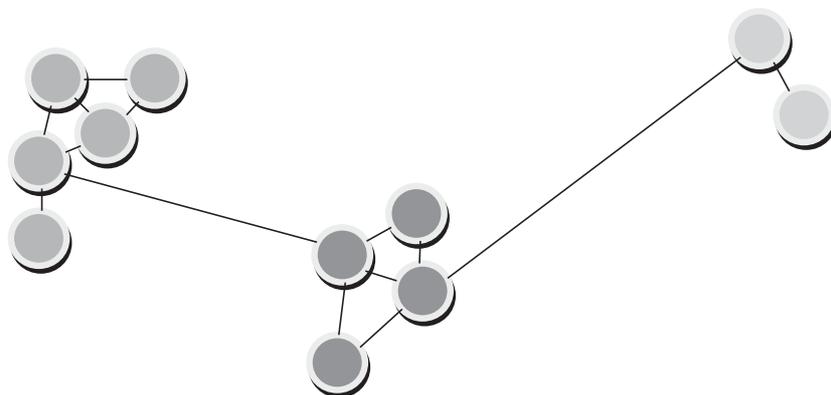
Принципы управления сложностью. Напомним, что любая попытка упростить сложную проблему, не полностью управляемую нами, такую как глобальное потепление или динамика развития мирового рынка, нецелесообразна. Решение, которое будет получено при этом, будет решением упрощённой, а не исходной сложной задачи.

Однако если необходимо вести разработки с нуля или изменить основные параметры сложных систем (например, мультиагентное программное обеспечение или глобальная сеть, объединяющая финансовые институты), в наших руках имеются многочисленные инструменты для поддержания их стабильности.

Основные принципы проектирования довольно просты:

- проектирование Онтологии сети, включая правила, которые регулируют, но не ограничивают автономность Агентов;
- назначение Агентов Предприятия для представления интересов всего сообщества при взаимодействии Агентов;
- разбиение сети на области (логические, а не географические) и ограничение количества соединений и скорости передачи информации между областями (см. рисунок);
- ограничение скорости транзакций между Агентами.

Эти правила можно применить при анализе сложной структуры существующей цифровой сети, объединяющей финансовые институты во всем мире.



Заключение. В соответствии с анализом, проведённым в данной работе, существующая мировая финансовая сеть имеет системные проблемы:

1. Регулирование финансовых институтов недостаточно гибко: степень свободы банков в рационализаторских нововведениях была излишней в условиях стабильного развития системы и недостаточной в условиях кризиса.

2. Слишком высокие скорости финансовых транзакций и взаимосвязь финансовых институтов увеличивают риск неустойчивости и, возможно, уже привели к возникновению чрезвычайных событий.

Указанные проблемы можно решить:

— разбиением финансового сектора на некоторое количество логических или географических областей для ограничения риска распространения чрезвычайных событий на всю мировую систему;

— разработкой Онтологии финансовых услуг для каждой области с применением экспертных знаний в сферах банковского дела, инвестирования, торговли финансовыми активами и региональных особенностей;

— созданием мультиагентных моделирующих программ для оценки работы региональных и мировых финансовых систем;

— введением осмысленного регулирования, по возможности разного для каждого из отдельных регионов и основанного на продолжительной оценке работы системы.

Как отмечено в начале данной работы, эти выводы сделаны исходя из аналогий, а не прямого исследования финансовой системы и поэтому носят умозрительный характер. Однако изучение мировой финансовой системы с позиции теории сложных систем вероятнее всего привело бы к аналогичным результатам.

Автор данной работы выражает благодарность за неоценимую поддержку доктору П. Скобелеву, руководившему талантливой командой российских программистов, разработавших интеллектуальные системы, которые использовались в ходе экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Prigogine I.** The end of certainty: Time, chaos and the new laws of nature. N. Y.: Free Press, 1997. 228 p.
2. **Prigogine I.** Is future given? World Scientific Publishing Co., 2003. 160 p.
3. **Holland J.** Emergence: from chaos to order. Oxford University Press, 1998. 272 p.
4. **Beinhocker E.** The origin of wealth: evolution, complexity and the radical remaking of economics. Random House Business Books, 2007. 544 p.
5. **Anderson C.** The long tail: How endless choice is creating unlimited demand. Random House Business Books, 2006. 256 p.
6. **Surowiecki J.** The wisdom of crowds. Abacus, 2004. 320 p.
7. **Lanham R.** The economic of attention. The University of Chicago Press, 2007. 326 p.
8. **Taleb N. N.** The black swan: The impact of the highly improbable. Penguin Books, 2007. 400 p.
9. **Kapitsa S.** Global population blow-up and after: The demographic revolution and information society // Report to the Club of Rome. Hamburg, 2006. 256 p.
10. **Rzevski G.** Investigating current social, economic and educational issues using framework and tools of complexity science // Journ. World University Forum. 2008. 1, N 2.
11. **Rzevski G., Skobelev P.** Emergent intelligence in large scale multi-agent systems // Intern. Journ. Education and Inform. Technol. 2007. 1, Is. 2. P. 64–71.
12. **Rzevski G.** A new direction of research into artificial intelligence // Invited Paper, The Annual Conference of Sri Lankan Association for Artificial Intelligence. Colombo, 2008.

13. **Rzevski G.** Ontology and Relativity // Volga Conference on Complex Adaptive Systems. Samara, Russia, 2005.
14. **Rzevski G., Skobelev P., Andreev V.** Magenta toolkit: A set of multi-agent tools for developing adaptive real-time applications // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing: Third Intern. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2007). Regensburg, Germany, September 2007. Springer LNAI 4659. P. 303–314.
15. **Andreev S., Rzevski G., Shveikin P. et al.** Multi-agent scheduler for rent-a-car companies // Proc. of 8th Intern. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009). May, 10–15, 2009. Budapest, Hungary.
16. **Glaschenko A., Ivaschenko A., Rzevski G., Skobelev P.** Multi-agent real time scheduling system for taxi companies // Ibid.
17. **Rzevski G., Himoff J., Skobelev P.** Magenta technology: A family of multi-agent intelligent schedulers // Workshop on Software Agents in Information Systems and Industrial Applications (SAISIA). Fraunhofer IITB. February 2006.
18. **Andreev M., Rzevski G., Skobelev P. et al.** Adaptive planning for supply chain networks // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing: Third Intern. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2007). Regensburg, Germany, September 2007. Springer LNAI 4659. P. 215–225.
19. **Rzevski G., Skobelev P., Minakov I., Volman S.** Dynamic pattern discovery using multi-agent technology // Proc. of the MATH, SIP, TELE-INFO Conferences in Dallas, March 2007.
20. **Rzevski G., Skobelev P.** Agent based semantic web. Semantic Universe Website, 2009.
21. **Rzevski G., Skobelev P., Batishchev S., Orlov A.** A framework for multi-agent modelling of virtual organisations // Processes and Foundations for Virtual Organisations. Kluwer Academic Publishers, 2003. P. 253–260.

Поступила в редакцию 15 января 2010 г.
