

## 1.5. О МОДЕЛЯХ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ В ЦИФРОВОМ ОБЩЕСТВЕ

Горелов М.А., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник,  
Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН

Ерешко Ф.И., д.т.н., заведующий отделом информационно-вычислительных систем,  
Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН

*В работе обсуждается ситуация, сложившаяся в теории управления в связи с активным развитием идей цифровизации общества. Наиболее ярко публицистически трансформация общества представлена в книге-манифесте К. Шваба «Четвертая промышленная революция». Приводится описание позиции и проектов отечественных ученых. Рассмотрен проект Биткойн как текущий социально-экономический эксперимент, а в связи с ним – ряд теоретико-игровых моделей. Рассмотрена серия линейных моделей принятия решений, приводятся некоторые формальные результаты о соотношении централизации и децентрализации в общем нелинейном случае.*

В настоящее время общество переживает период активного проникновения информационных технологий во все сферы жизнедеятельности, бурно развивается информационное общество и цифровая экономика (digital economy). Цифровая экономика базируется на цифровых компьютерных технологиях, ее продукты находят применение в разнообразных отраслях реального производства товаров и услуг.

Сейчас распространено определение цифровой экономики как экономики данных. Однако памятуя определение Н. Вирта, что программирование – это алгоритм и структура данных, имеет смысл говорить о цифровой экономике как об экономике алгоритмов и данных. Вслед за этим мы обращаемся к понятию математического моделирования. Ведь современные достижения цивилизации напрямую связаны с использованием понятия модели, что нашло свое отражение во всех разделах естествознания и, более широко, культуры.

Цифровая экономика в широком смысле этого слова – это вся экономика, насыщаемая цифровыми продуктами. В результате широкого распространения электричества и внедрения конвейера, начавшегося в конце XIX и продлившегося до начала XX века, возникло новое массовое производство и можно было говорить об электрической экономике. Точно так же можно было говорить о нефтяной экономике. Цифровая экономика в узком смысле слова – это экономика, основанная на цифровых компьютерных технологиях, выпускающая цифровые продукты.

Примеры цифровых продуктов – это продукты умственного или преимущественно умственного с привлечением минимального количества физического труда, произведенные с использованием интеллектуальных технологий и вычислительных средств: это числа  $\pi$  и  $e$ , физические и химические константы, алгоритм Евклида, пси-функция Шредингера, эффект ядерной зимы, результаты вычислительных экспериментов. В ряду этих продуктов находятся теперь и цифровые валюты. Цифровые технологии, основанные на аппаратном и программном обеспечении и сетях, не являются новшеством, но с каждым годом, уходя все дальше от третьей промышленной революции, они становятся все более усовершенствованными и интегрированными, вызывая трансформацию общества и глобальной экономики. (К. Шваб).

Технологической базой цифровой экономики являются вычислительные комплексы, оснащенные специальным программным обеспечением на основе математических моделей, вычислительные платформы. Многие мыслители предвосхищали наступление новой эпохи, один из ярких футурологов – Э. Тоффлер. Его книга [1], в английском издании «The Third Wave: The Classic Study of Tomorrow», 1980 г. в изложении Н.Н. Моисеева на семинарах оставила свой след в нашем сознании, но имела в то время характер далекого и абстрактного образа будущего мира. Тем ярче выглядит прочтение этих мыслей сейчас. Приведем некоторые тезисы книги 1980 года. «С наступлением второй индустриальной волны СМИ заняли ключевое место в стандартизации поведения, необходимой для индустриального производства. С 1970-х годов число микро-СМИ увеличилось лавинообразно. Все это приводит к грандиозному скачку в объемах информации, которой мы все обмениваемся. Главным противоречием современности будет противоборство между защитниками отжившей свое индустриальной цивилизации и сторонниками идущего ей на смену информационного общества (1970-2025 гг.)».

Книга-манифест [2] Клауса Шваба, лидера Давоса, провозглашающая основной тренд развития мировой экономики в направлении взрывного характера рождения цифровых технологий, убедительно демонстрирует, что современное состояние общества в значительной степени определяется цифровизацией. В работе приведена фраза «...Дизруптивные изменения, которые несет четвертая промышленная революция, переопределяют деятельность государственных учреждений и организаций... Новые технологии и социальные группировки и взаимодействия, которые ими обеспечиваются, позволяют практически кому угодно оказывать влияние на ситуацию и при этом такими способами, о которых невозможно было бы подумать еще несколько лет назад...».

Одной из таких технологий является технология блокчейн (специальная технология ведения распределенных реестров с использованием криптографических алгоритмов и алгоритмического достижения консенсуса). Можно предположить, что основой принятия решений в экономике станут вычислительные платформы, отражающие отдельные функциональные отрасли.

### Отечественные достижения. Исторический экскурс

В отечественных работах, которые велись в разных научных школах во многих академических институтах в областях теории управления и поддержки принятия решений, были получены значимые результаты в системном анализе, теории оптимизации, исследовании операций, теории игр, моделировании экономических процессов, теории управления [3–15]. В книге [12], где были суммированы идеи управления экономическими системами, накопленные к тому времени, был принципиально поставлен вопрос о новом значении информации в жизни общества и описана трехуровневая в территориальном аспекте система ЭВМ, которые, накапливая и обрабатывая информацию, генерировали бы проекты государственных планов и реализовывали бы функции принятия решений. Система получила название Общегосударственной автоматизированной системы управления (ОГАС). В художественной форме эти идеи сейчас описываются в американской литературе<sup>1</sup>: «Идея Глушкова заключалась в том, чтобы перейти к эпохе электронного социализма. Он назвал свой невероятно амбициозный проект Общегосударственной автоматизированной системой (ОГАС). Она предназначалась для оптимизации и технологической модернизации всей плановой экономики. Он считал, что такая система должна принимать экономические решения в соответствии с государственными планами, а не по рыночным ценам, однако полагал, что ее работа ускорится благодаря компьютерному моделированию, и она сможет прогнозировать равновесие платежного баланса еще до его достижения. Глушков хотел, чтобы решения принимались оперативнее и с умом, и даже задумывался об электронных деньгах. Ему был нужен кошелек Политбюро».

Вот еще пример – книга «Как НЕ опутать сетью страну: Непростая история советского Интернета». Ее автор, профессор коммуникационных технологий Университета Тусла Бенджамин Петерс, довольно подробно и с большим уважением рассказал о работе выдающихся советских ученых-кибернетиков Виктора Глушкова и Анатолия Китова, которые занимались разработкой передовых электронно-вычислительных технологий.

Американское сообщество исследователей информационно-коммуникационных технологий встретило книгу Петерса с большим интересом. «Она заполнила пробел в истории интернета, подчеркнув, насколько важны преемственность и открытость для сетевых разработок», – заявил профессор Джонатан Зиттрейн из Гарвардского университета. Автор книги, по мнению Зиттрейна, проделал колоссальную работу, представив широкой публике факты, о которых на Западе даже не догадывались. «К примеру, в книге не раз подчеркивается, что и советские, и американские ученые практически одновременно делали важные шаги на пути развития компьютерных технологий. Причем СССР нередко обгонял США. Так, в конце 1969 года в Америке была запущена компьютерная сеть ARPANET (прародитель Интернета). В Советском Союзе идею связать ЭВМ единой сетью впервые озвучил Анатолий Китов еще в 1959 году, предложив создать единую ав-

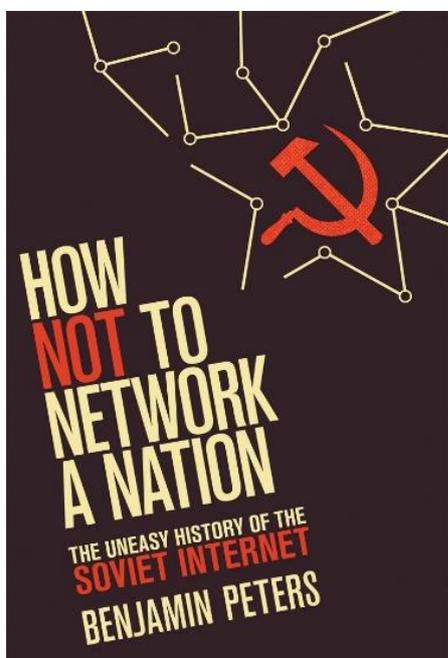


Рисунок 1.  
Книга «Как не опутать сетью страну»

томатизированную систему управления для вооруженных сил. А первые наработки в гражданской сфере появились в 1962 году, когда Виктор Глушков представил проект Общегосударственной автоматизированной системы учета и обработки информации (ОГАС), которая предназначалась для автоматизированного управления всей экономикой СССР».

Однако этот проект по тем временам был, во-первых, слишком затратным, во-вторых вызвал сильное противодействие системы управления<sup>2</sup> и в результате не получил поддержки. Но если в СССР это не получилось, то что же сейчас? Сейчас не нужно тратить деньги на вычислительную сеть – уже есть Система распределенных ситуационных центров (СРСЦ) [16], и частным образом общество насыщено смартфонами. Успешно развита теория принятия решений, и имеется опыт разработки систем управления социально экономическими системами.

<sup>1</sup> Чип и del. Американский профессор о достижениях советских кибернетиков, Анна Федякина, Российская газета - Федеральный выпуск №7116 (248), rg.ru, 01.11.2016

<sup>2</sup> см. [http://zavtra.ru/blogs/tcifrovaya\\_ekonomika\\_i\\_sovetskaya\\_ekonomika](http://zavtra.ru/blogs/tcifrovaya_ekonomika_i_sovetskaya_ekonomika)

### Проект Биткоин

Для цифровой экономики характерно появление новых конструкций, первоначально имеющих характер искусственных образований, возникающих в теоретических рассуждениях авторов в области компьютерного моделирования, а затем превращающихся в реальный социально-экономический процесс. Таким современным ярким процессом является Проект Биткоин [17].

Проект, по сути, – это организация экономической деятельности группы лиц, первоначально, в своей задумке создаваемый как вариант платежной системы для группы частных лиц, преобразовался в своей последующей реализации в проект, ориентированный на увеличение богатства этих лиц путем производства цифрового продукта (биткоина). Как мы наблюдаем сейчас, цена биткоина в долларах стремительно возрастает, и тем самым возрастает богатство участников, хотя и проявляется большая изменчивость в цене.

В Проекте Биткоин принимает участие динамическая коалиция (члены приходят, уходят). Участники входят в коалицию, получая исходное программное обеспечение от ядра биткоина, начинают его использовать, принимая условия членства в сообществе Проекта Биткоин.

Проект состоит из следующих блоков [18].

- **Блок производства** продукта (майнинг, proof-to-work). При этом решается задача поиска параметра *nonce* в неравенстве  $h(block, nonce) \leq d$ , где *d* задается алгоритмически по заданной известной всем формуле, *h*-криптографическая хэш-функция sha256, утвержденная Бюро стандартов США, *block* – заданная характеристика предыдущей записи участника.
- **Блок использования** продукта (транзакции), задается процедурами обмена цифрового продукта на продукты и услуги участников Коалиции.
- **Блок хранения** продукта и транзакций, процедура ведения криптографически защищенных распределенных реестров (технология блокчейн).

Интерес к такой организации Проекта Биткоин для нас (исследователей операций, специалистов в теории управления) состоит в том, что перед нами разворачивается живой социально-экономический эксперимент, в котором реализуются различные механизмы управления. Имеется широкий простор для постановки различных задач, причем вызывающих обширный животрепещущий интерес во всем мире. Для того, чтобы проиллюстрировать игровые задачи, которые там возникают, приведем выдержку из Принстон-лекций [19].

#### Влиятельные игроки: кто за главного?

Кто влияет на биткоин, и кто за него в ответе? Насчет того, кто же главный в мире биткоина, можно высказать несколько предположений.

**1. Власть у разработчиков ядра** – они пишут правила, их кодом пользуются почти все остальные участники.

**2. Власть у майнеров** – они пишут историю и решают, какие транзакции верны (валидны). Если майнеры решат следовать определенному своду правил, практически все будут вынуждены подчиниться. Выделение подгруппы участников (Разветвление, Форк) с большей мощностью сети породит более безопасный и мощный блокчейн, и потому будет иметь возможность направлять правила в определенную сторону. Вся их власть зависит от того, идет ли речь о хард- или софт-форке, но в любом случае определенные полномочия у них имеются.

**3. Власть у инвесторов** – они покупают и хранят биткоины, так что именно инвесторы решают, что у биткоина есть ценность. Можно даже сказать, что если разработчики контролируют консенсус правил, а майнеры – консенсус истории, то инвесторы контролируют консенсус ценности.

**4. Власть у продавцов и покупателей** – они формируют первичный спрос на биткоин. Если инвесторы обеспечивают некоторый спрос, который поддерживает цену валюты, то первичный спрос ею управляет, и возникает он из желания осуществлять транзакции в биткоинах, выступающих в роли технологии платежа. Инвесторы с этой точки зрения лишь пытаются угадать, каким в будущем станет первичный спрос.

**5. Власть у платежных операторов** – именно они проводят транзакции. Многим продавцам неважно, какой валютой они пользуются в процессе – их интересует лишь то, чтобы платежный сервис под конец дня выплачивал им доходы. Сервисы позволяют своим клиентам расплачиваться криптовалютой и берут на себя все сопутствующие риски. Так что, возможно, именно такие сервисы отвечают за первичный спрос, а продавцы, покупатели и инвесторы лишь следуют за ними.

Как можно видеть, зерно истины есть в каждом из этих предположений – часть власти досталась каждой из перечисленных категорий игроков. Чтобы быть успешной, монете в системе Биткоин необходимы все формы консенсуса – стабильная книга правил, написанная разработчиками, майнинговая мощность, инвестиции, участие покупателей и продавцов и платежные сервисы, которые их поддерживают. Все эти стороны имеют некоторую власть над исходом битвы за будущее биткоина, но среди них нет никого, кто мог бы однозначно выбрать победителя.

Есть лишь один игрок, напрямую отвечающий за управление биткоином – **Фонд биткоина**. Он был основан в 2012 в качестве некоммерческой организации и играет две основные роли – финансирование некоторых разработчиков ядра за счет средств фонда, чтобы те могли работать полный рабочий день над разработкой ПО, и проведение переговоров с властями, особенно с правительством США, в качестве «голоса биткоина».

Некоторые члены сообщества считают, что биткоин должен существовать вне рамок юрисдикции традиционных национальных правительств. По их мнению, биткоин имеет международную природу и не должен как-то отчитываться перед правительствами или вступать с ними в переговоры. Другие же считают иначе – с их точки зрения регулирование неизбежно и даже желательно, и потому интересы сообщества должны быть представлены в кругах власти, а аргументы его – услышаны. Фонд частично возник из-за этой потребности, и нельзя не отметить, что переговоры с властями во многом облегчили путь к пониманию и принятию биткоина. Фонд, тем не менее, – организация достаточно противоречивая. Многие из членов правления были уличены в уголовных преступлениях или испытывают финансовые проблемы, а то, насколько фонд реально представляет сообщество, достаточно спорный момент.

Другая некоммерческая группа – **Коинцентр (Coin Center)** была организована в сентябре 2014 г. со штаб-квартирой в городе Вашингтоне, и взяла на себя одну из ролей Фонда – а именно работу с властями. Коинцентр действует как научная организация. Но ни Фонд, ни Центр не несут за биткоин ответственности больше, чем другие игроки. Успешность и легитимность любого такого представителя зависит от того, сколько поддержки и финансирования он может со временем получить от сообщества. Именно так и работает открытая экосистема.

Таким образом, нет единого учреждения или группы, которая определенно управляет развитием Проекта Биткоин. В известном смысле за биткоин отвечают все, так как его существование основано на трех взаимосвязанных формах консенсуса – правилах, истории и ценности.

Любой свод правил, группа или управляющая структура, которые могут поддерживать этот консенсус в течение известного времени, можно считать ответственными.

### Технология Блокчейн

Одна из задач в этом проекте привлекла наше особое внимание, поскольку именно в технологии блокчейн наиболее четко сформирована и реализована идея децентрализации. В завершающем абзаце обзора [20], непосредственно посвященном проблематике использования технологий блокчейна в теории принятия решений, указывается, что децентрализованные приложения и децентрализованные организации на базе блокчейн могут создавать затруднения правительственным организациям в исполнении управляющих и регулирующих функций.

Как написано в книге Андреаса Антонопулоса [18]: «...главный принцип безопасности Биткоин – это децентрализация. Централизованная модель, такая как, например, традиционный банк или платежная система, сдерживает нечестных игроков, основываясь на контроле доступа. Для сравнения, децентрализованная система такая, как Биткоин, передает ответственность в руки самих пользователей. Транзакция в Биткоин авторизует лишь конкретное значение для конкретного получателя и не может быть подделана или изменена. Она не раскрывает какой-либо личной информации, такой, как имена сторон, и не может быть использована для двойных платежей. Децентрализованная модель безопасности Bitcoin дает много возможностей в руки пользователей, но с этими возможностями приходит и ответственность за сохранение секретности ключей».

Широко распространенные в различных публикациях утверждения о том, что при использовании технологии блокчейн нет необходимости в централизации, некорректны, поскольку всегда наличествует первый шаг в организации коалиции, когда формируется тот самый алгоритм координирующего управления, который действует автоматически. Стратегия блокчейна автоматизирована, а не является полностью автоматической. Как отмечается в Принстон-лекциях [19]: «Децентрализация – это не все или ничего; почти ни одна система не является полностью децентрализованной или полностью централизованной. Протокол биткоина должен достигать консенсуса, сталкиваясь с двумя типами препятствий: несовершенство сети, такое как задержка связи и перебой в работе узлов, а также попытка саботировать процесс со стороны отдельных узлов. Как ни странно, последние наблюдения и исследования показали, что консенсус в биткоине гораздо лучше работает на практике, чем в теории. Таким образом, мы можем наблюдать, как работает консенсус, но не имеем никакой проработанной теории для тщательного объяснения того, как он работает. Но разработка некой теории очень важна, поскольку она поможет нам предсказать непредвиденные атаки и проблемы, и только когда мы будем иметь сильное теоретическое понимание того, как работает консенсус в биткоине, мы сможем давать серьезные гарантии безопасности и масштабируемости биткоина. Какие предположения принимаются в биткоине? Во-первых, он вводит идею стимулирования участников, которая является новой для протокола распределенного консенсуса. Во-вторых, биткоин включает в себя понятие случайности, алгоритм консенсуса в биткоине во многом полагается на рандомизацию. Проблема достижения консенсуса между участниками распределенной сети, не доверяющими друг другу, представляет собой одну давнюю проблему, известную в компьютерной научной литературе как «задача о византийских генералах»: для нее в системе Bitcoin также нашлось удачное решение».

### Формальные модели

Ответ на вопрос «Зачем нужны формальные модели, в частности, теория игр?» дал Нобелевский комитет в пресс-релизе при выдаче премии 2016 года по экономике (по теории контрактов): «В современной экономике содержится неисчислимо число контрактов. Новые теоретические инструменты, созданные авторами (Hart и Holmström), ценны для понимания реальных контрактов и институтов, а также для учета возможных подводных камней в разработке контрактов. Их анализ оптимальных контрактов закладывает интеллектуальный фундамент для разработки стратегий и институтов во многих областях, от законодательства о банкротстве до политических конституций».

### Модели централизации и децентрализации

В цифровом обществе должна быть цифровизируемая, т.е. ориентированная на математическое моделирование, теория управления. Отечественные установки и первоначальные достижения в этом направлении отражены в работах [10–11], где были сформулированы основные положения информационной теории иерархических систем, и поставлена проблема моделирования процессов децентрализации–централизации власти. Тема централизации–децентрализации имеет практически бесконечную историю в обществе, что впечатляюще изложено в обзоре по теме децентрализации [20].

Значительно возросший в настоящее время интерес к этой проблематике основан на взрывном характере проникновения цифровых технологий в сферу государственного и муниципального управления [2]. Введение формализации и алгоритмизации при формировании и реализации договоренностей между участниками коалиции позволяет внести элементы автоматизации в этот процесс. Алгоритмическое исполнение договоренностей участников, использующих в сообществе технологию блокчейн, получило название «умный» контракт. На более высоком уровне организации жизнедеятельности общества можно говорить о подобном использовании цифровых технологий в законодательстве. Примеры «умных» законов приводятся в [21].

Могут иметь место два крайних случая: централизация и децентрализация, что касается организации, и полной и неполной информированности относительно параметров и стратегий участников как правил принятия решений в зависимости от имеющейся в наличии информации.

### Линейные задачи. От децентрализации к централизации. Координирующий Центр

#### Исходная постановка проблемы

Рассматривается группа экономически независимых, самостоятельно действующих агентов. В своей деятельности они используют наборы технологий, потребляют ресурсы и производят продукцию, которую реализуют на внешнем рынке. Кроме собственных запасов ресурсов имеется набор общих ресурсов, не принадлежащих отдельным членам группы, но пригодных для использования агентами, и дележ общих ресурсов представляет интерес для всей группы.

Члены группы принимают решение объединиться и создать Коалицию, деятельность которой будет выгодна для всех, и рассматривают различные механизмы организации функционирования коалиции. Создается координирующий Центр, который на основе принятого алгоритма осуществляет автоматические регулирующие функции.

#### Описание технологических ограничений

Рассмотрим стандартную постановку. Пусть имеется  $n$  агентов. Будем обозначать их числами от 1 до  $n$ . Каждый агент может производить  $m$  видов продукции, затрачивая при этом некоторые ресурсы. Число ресурсов будем обозначать буквой  $k$ . На производство единицы продукта вида  $j$  агент  $i$  затрачивает ресурс вида  $l$  в количестве  $p_{lj}^i$ . Агент  $i$  имеет собственный запас ресурса вида  $l$  в количестве  $b_l^i$  ( $l = 1, 2, \dots, k$ ). Кроме того, имеются общие запасы ресурсов в количестве  $r_l$  ( $l = 1, 2, \dots, k$ ). Продукция вида  $j$  может быть реализована на рынке по цене  $c_j$ . Таким образом, если агент  $i$  произведет продукцию вида  $j$  в количестве  $x_j^i$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ), то он потратит ресурс вида  $l$  в количестве  $p_{l1}^i x_1^i + p_{l2}^i x_2^i + \dots + p_{lm}^i x_m^i$ , а реализовать эту продукцию он сможет за сумму  $c_1 x_1^i + c_2 x_2^i + \dots + c_m x_m^i$ . По своему смыслу цены  $c_j$  положительны, а коэффициенты затрат  $p_{kj}^i$  и запасы  $b_l^i$  и  $r_l$  неотрицательны.

Далее будет удобно использовать следующие матричные обозначения. Обозначим через  $x^i$  вектор столбец  $(x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i)^T$  (верхний индекс  $T$ , как обычно, обозначает транспонирование). Пусть  $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ , а матрица затрат выглядит следующим образом

$$P^i = \begin{pmatrix} p_{11}^i & p_{12}^i & \dots & p_{1m}^i \\ p_{21}^i & p_{22}^i & \dots & p_{2m}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{k1}^i & p_{k2}^i & \dots & p_{km}^i \end{pmatrix}.$$

Обозначим  $b^i = (b_1^i, b_2^i, \dots, b_k^i)^T$ ,  $r = (r_1, r_2, \dots, r_k)^T$ . В этих обозначениях предыдущие формулы будут выглядеть следующим образом. Если агент  $i$  выпустит продукцию, в количестве  $x^i$ , то он сможет выручить за нее сумму  $cx^i$ , и при этом будут затрачены ресурсы в количестве  $y^i = P^i x^i$ , где  $y^i$  – вектор столбец  $(y_1^i, y_2^i, \dots, y_k^i)^T$ .

**Первая задача. Интервальная неопределенность. «Жесткое» управление**

Предположим, что управление системой осуществляется централизованно, то есть существует некоторый дополнительный координирующий орган (Центр), который выбирает объемы общих ресурсов, выделяемых каждому агенту, и его программу выпуска продукции. При этом он стремится по общему коалиционному решению к максимизации суммарного дохода системы.

Оставляем вопросы дележа полученного общего результата на следующий этап принятия решений в коалиции. Будем считать, что характеристики агентов известны Центру неточно. В данной постановке будем предполагать, что Центру не известны точно коэффициенты матриц  $P^i$  и векторов  $b^i$ . Центр знает лишь, что  $p_{lj}^{i-} \leq p_{lj}^i \leq p_{lj}^{i+}$  и  $b_l^{i-} \leq b_l^i \leq b_l^{i+}$ . Введя обозначения

$$P^{i-} = \begin{pmatrix} p_{11}^{i-} & p_{12}^{i-} & \dots & p_{1m}^{i-} \\ p_{21}^{i-} & p_{22}^{i-} & \dots & p_{2m}^{i-} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{k1}^{i-} & p_{k2}^{i-} & \dots & p_{km}^{i-} \end{pmatrix}, P^{i+} = \begin{pmatrix} p_{11}^{i+} & p_{12}^{i+} & \dots & p_{1m}^{i+} \\ p_{21}^{i+} & p_{22}^{i+} & \dots & p_{2m}^{i+} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{k1}^{i+} & p_{k2}^{i+} & \dots & p_{km}^{i+} \end{pmatrix},$$

$$b^{i-} = (b_1^{i-}, b_2^{i-}, \dots, b_k^{i-})^T, b^{i+} = (b_1^{i+}, b_2^{i+}, \dots, b_k^{i+})^T,$$

эти условия можно символически записать в виде  $P^{i-} \leq P^i \leq P^{i+}$  и  $b^{i-} \leq b^i \leq b^{i+}$ . В описанных условиях будем считать, что Центр должен выбирать управления так, чтобы ресурсов у каждого агента хватило на предложенную ему программу выпуска при любой матрице  $P^i$  и любом векторе  $b^i$  из указанных диапазонов. Таким образом, перед Центром стоит нестандартная задача оптимизации следующего вида:

$$cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n \rightarrow \max,$$

$$P^i x^i \leq b^i + y^i, i = 1, 2, \dots, n, y^1 + y^2 + \dots + y^n \leq r, x^i \geq 0, y^i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n.$$

Если выполняются условия  $P^{i+} x^i \leq b^{i-} + y^i, i = 1, 2, \dots, n$ , то соответствующие условия сформулированной выше задачи будут выполнены для любых допустимых матриц  $P^i$  и векторов  $b^i$ . Следовательно, Центру нужно решить стандартную задачу линейного программирования. Управлениями Центра в этой задаче, разумеется, являются векторы выпусков  $x^i$  и векторы выделенных агентам ресурсов  $y^i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Решение определится путем использования теоремы Куна–Таккера.

**Вторая задача.  $\alpha$ -параметрическая неопределенность. «Жесткое» управление**

В этом варианте постановки задачи будем по-прежнему считать, что управления  $x^i$  и  $y^i$  выбираются централизованно, и в условиях неполной информации о параметрах модели. Но неопределенность в данном случае будем задавать несколько иначе. А именно, будем считать, что значения коэффициентов

матриц  $P^i$  и векторов  $b^i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) зависят от некоторого неопределенного фактора  $\alpha$ . Про этот фактор лицу, принимающему решение, известно лишь некоторое множество возможных значений  $A$ .

Для простоты будем предполагать, что множество  $A$  наделено топологией и компактно, а функции  $p_{ij}^i(\alpha)$  и  $b_j^i(\alpha)$  непрерывны в этой топологии. Таким образом, центр должен решать следующую задачу оптимизации:

$$\begin{aligned} cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n &\rightarrow \max, \\ P^i(\alpha)x^i &\leq b^i(\alpha) + y^i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \alpha \in A, \quad y^1 + y^2 + \dots + y^n \leq r, \\ x^i &\geq 0, \quad y^i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

В случае, когда множество  $A$  бесконечно, для ее редукции к задаче оптимизации с конечным числом ограничений рассмотрим функции

$$f^i(x^i) = \max_{\alpha \in A} \max_{l=1, 2, \dots, k} (p_{l1}^i x_1^i(\alpha) + p_{l2}^i x_2^i(\alpha) + \dots + p_{lm}^i(\alpha) x_m^i - b_l^i(\alpha)), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Функции  $f^i(x^i)$  являются выпуклыми. Поэтому исходная задача эквивалентна следующей задаче выпуклого программирования:

$$\begin{aligned} cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n &\rightarrow \max, \\ f^i(x^i) &\leq y^i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad y^1 + y^2 + \dots + y^n \leq r, \\ x^i &\geq 0, \quad y^i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

Далее решение получается так же с использованием теоремы Куна – Таккера.

**Третья задача. Интервальная неопределенность. «Мягкое» управление**

В данном варианте будем предполагать, что Центр выбирает распределение ресурсов  $y^1, y^2, \dots, y^n$ . Объем выпуска продукции  $x^i$  выбирает  $i$ -й агент. При этом он преследует собственные цели, которые описываются стремлением к максимизации критерия  $c^i x^i$ .

Центру известны пределы, в которых могут меняться коэффициенты матриц  $P^i$  и векторов  $b^i$  ( $P^{i-} \leq P^i \leq P^{i+}$  и  $b^{i-} \leq b^i \leq b^{i+}$ ). Множества матриц  $P^i$  и векторов  $b^i$ , удовлетворяющих условиям  $P^{i-} \leq P^i \leq P^{i+}$  и  $b^{i-} \leq b^i \leq b^{i+}$  обозначим через  $\Pi^i$  и  $B^i$  соответственно. Кроме того, Центр точно знает интересы партнеров (векторы  $c^i = (c_1^i, c_2^i, \dots, c_m^i)$ ).

Каждый из агентов точно знает «свои» матрицу  $P^i$  и вектор  $b^i$ . Будем предполагать, что Центр обладает правом первого хода, т.е. он первым выбирает свои управления  $y^1, y^2, \dots, y^n$  и сообщает о своем выборе партнерам. При этом он рассчитывает на то, что все агенты рациональны, то есть  $i$ -й агент выбирает свои управления  $x^i$  из множества  $BR^i(y^i, P^i, b^i)$  всех решений задачи

$$c^i x^i \rightarrow \max, \quad P^i x^i \leq b^i + y^i, \quad x^i \geq 0.$$

В этих условиях, выписывая максимальный гарантированный результат Центра и сравнивая с первой задачей, получаем, что максимальный гарантированный результат Центра в третьей задаче при «мягком» управлении всегда не превосходит максимального гарантированного результата Центра в первой задаче при «жестком» управлении.

**Четвертая задача.  $\alpha$ -параметрическая неопределенность. «Мягкое» управление»**

Вновь будем предполагать, что Центр выбирает распределение ресурсов  $y^1, y^2, \dots, y^n$ . Объем выпуска продукции  $x^i$  выбирает  $i$ -й агент. При этом он преследует собственные цели, которые описываются стремлением к максимизации критерия  $c^i x^i$ .

Считаем, что Центру неизвестны точно технологические матрицы  $P^i$  и собственные запасы ресурсов  $b^i$  агентов. Известно лишь, что они принадлежат параметрическим семействам  $P^i(\alpha)$  и  $b^i(\alpha)$ , где  $\alpha$  принадлежит некоторому множеству  $A$ .

Агентам же точно известны собственные технологии и возможности.

Как и в предыдущем разделе предполагаем, что Центр обладает правом первого хода.

Результат в этой задаче естественно сравнивать с максимальным гарантированным результатом Центра во второй задаче. В данном случае возможны различные варианты. Может оказаться, что максимальный гарантированный результат Центра в четвертой задаче больше чем аналогичный результат во второй задаче, то есть децентрализация целесообразна, а возможен и противоположный случай. Построены соответствующие примеры.

### Общий случай

В работах [10,11] советские математики Ю.Б. Гермейер и Н.Н. Моисеев выдвинули тезис о том, что иерархия возникает там и тогда, где и когда для эффективного управления системой необходимо обрабатывать слишком большой объем информации о внешней среде. В этом случае лицо, принимающее решения (Центр) может делегировать часть своих полномочий по выбору управлений подчиненным.

Разумеется, при этом подчиненные, выбирая управления, могут (и будут) преследовать свои цели. Но при некоторых условиях Центр от такой децентрализации все же может выиграть. Далее формулируется задача и ее решение, демонстрирующее этот эффект на простейшей из нетривиальных моделей. Рассмотрим задачу управления некоторой системой с целью максимизировать выигрыш  $g(w, \alpha)$ , где  $w \in W$  – управление, а  $\alpha \in A$  – неконтролируемый фактор.

Будем предполагать, что система «технологически структурирована». Пока это будет означать, что множество  $W$  представимо в виде декартова произведения

$$W = U \times V^1 \times \dots \times V^n.$$

Будем считать, что, принимая решение о выборе управления  $w = (u, v^1, \dots, v^n)$ , Центр может иметь информацию о реализовавшемся значении неопределенного фактора  $\alpha$ , но объем этой информации не должен превышать  $l$  бит. Содержание этой информации выбирает Центр.

При децентрализации центр имеет возможность передоверить выбор управления  $v^i$  агенту  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). При этом, естественно, у агента  $i$  появляются свои интересы, которые описываются стремлением к максимизации своей функции  $h^i(u, v^i, \alpha)$ . Кроме того, выбирая свое управление  $v^i \in V^i$ , агент  $i$  точно знает реализовавшееся значение неопределенного фактора  $\alpha$ .

За собой Центр оставляет право выбора управления  $u \in U$ . При этом он по-прежнему может использовать  $l$  бит информации о неопределенном факторе.

Естественным образом возникает вопрос о сравнении эффективности двух способов управления. Поскольку исследование проводится в интересах Центра, мерой эффективности можно считать его максимальный гарантированный результат [22]. Разумно проводить сравнение при одном и том же значении объема доступной Центру информации  $l$ . Ясно, что ответ существенным образом зависит от того, насколько хорошо интересы агентов согласованы с интересами Центра. Опуская выкладки, приведем итоги. В нетривиальных случаях картина такова. Если интересы агентов «плохо согласованы» с интересами Центра, то всегда выгоднее централизованное управление. Если же интересы Центра и агентов «вполне хорошо согласованы», то при больших значениях  $l$  выгоднее централизация управления, а при малых значениях  $l$  предпочтительнее децентрализованное управление.

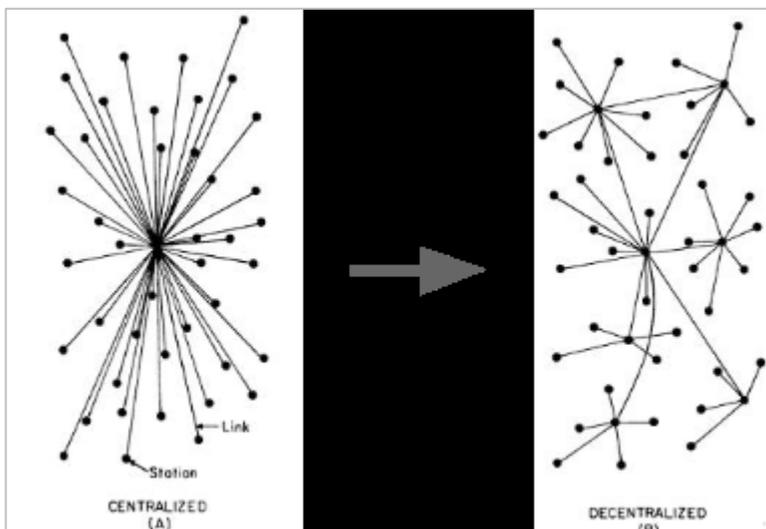


Рисунок 2. Динамические трансформации орг. структур

Проведенный анализ представляет некие начальные основания для дальнейшего исследования в области централизации – децентрализации. Кроме того, обратим внимание на факт возможных динамических трансформаций организационных структур, что иллюстрируется на схеме в работе Electronic copy available<sup>3</sup> (р. 19) и представленного на рисунке 2.

<sup>3</sup> Aaron Wright, Primavera De Filippi «Decentralized Blockchain Technology and the Rise of Lex Cryptographia» // <http://ssrn.com>, 20 Mar 2015

## Литература

1. Тоффлер Э. Третья волна = The Third Wave, 1980. – М.: АСТ, 2010. – 784 с.
2. Шваб К. Четвертая промышленная революция/ Пер. с англ. Предисловие Греф Г.О. – М.: «Эксмо», 2016 – с.138.
3. Канторович Л. В., Макаров В. Л. Оптимальные модели перспективного планирования, Применение математики в экономических исследованиях, М. Мысль, 1965.
4. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа: – М.: Наука, 1981. – 487 с.
5. Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976. – 328 с.
6. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М.: Наука, 1971. – 383 с.
7. Поспелов И.Г. Исследование операций и моделирование экономического развития // Материалы учредительной конференции Российского научного общества исследования операций. – М.: ВЦ РАН, 1997. – 105 с.
8. Ватель И.А., Ерешко Ф.И. Математика конфликта и сотрудничества. М.: Знание, 1973. – 64 с.
9. Ватель И.А., Ерешко Ф.И. Игры с иерархической структурой. // Математическая энциклопедия. т.2. М.: 1979. с.478–482.
10. Гермейер Ю.Б., Моисеев Н.Н. О некоторых задачах теории иерархических систем // Проблемы прикладной математики и механики. М.: Наука, 1971. С. 30–43.
11. Моисеев Н.Н. Информационная теория иерархических систем // Труды I Всесоюзн. конф. по исследованию операций. Минск: 1974. с. 95-99.
12. Глушков В.М. Макроэкономические модели и принципы построения ОГАС. М.: Статистика, 1975. – 160 с.
13. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. – 255 с.
14. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами: Учебное пособие. М.: МПСИ, 2005. – 584 с.
15. Бурков В.Н., Ириков В.А. Модели и методы управления организационными системами. М.: Наука, 1994. – 272 с.
16. Зацаринный А.А., Шабанов А.П. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. – 232 с.: ил.
17. Satoshi Nakamoto (2009). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System, satoshin@gmx.com, www.bitcoin.org
18. Antonopoulos, Andreas M. (2014). Mastering Bitcoin. UNLOCKING DIGITAL CRYPTOCURRENCIES, O'Reilly Media, Inc., – 272 p.
19. Narayanan A., Bonneau J., Felten E., Miller A., Goldfeder S.. Bitcoin and cryptocurrency technologies: a comprehensive introduction. Princeton : Princeton University Press, 2016. – 331 p. <https://en.wikipedia.org/wiki/Decentralization>
21. Ерешко Ф. И. Теория иерархических игр в приложении к законодательству в цифровом обществе. Бизнес в законе. // Computational nanotechnology, 2017, №2, С. 52–58.
22. Горелов М.А. Максимальный гарантированный результат при ограниченном объеме передаваемой информации // Автоматика и телемеханика. – 2011. – №3. – С. 124–144.

*Горелов Михаил Александрович (griever@ccas.ru)*

*Ерешко Феликс Иванович (fereshko@ccas.ru)*

## Ключевые слова

цифровизация общества, модель, информация, управление, теория иерархических игр, технология блокчейн, условия децентрализации

***Gorelov M.A., Ereshko F.I. Models of centralization and decentralization of management in digital society***

## Keywords

digitalization of society, model, information, management, theory of hierarchical games, blockchain technology, decentralization conditions

## Abstract

In article the situation which has developed in the theory of management in connection with active development of the ideas of digitalization of society is considered. Most brightly publicistic transformation of society is presented in the book manifesto by K. Schwab «The fourth industrial revolution». The description of a position and projects of domestic scientists is provided. The Bitcoin project as the current social and economic experiment, and communications with him a number of game-theoretic models is considered. A series of linear models of decision-making is considered, some formal results about correlation of centralization and decentralization are given in the general nonlinear case.

DOI: 10.34706/DE-2018-01-05