

Концептуальные и математические модели, методы и технологии исследования цифровой трансформации экономических и социальных систем: обзор предметного поля (часть II)*

Гейда А. С.^{1, 2, *}, Гурьева Т. Н.¹, Наумов В. Н.¹

¹Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Северо-Западный институт управления РАНХиГС), Санкт-Петербург, Российская Федерация; *geyda-as@ranepa.ru

²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

РЕФЕРАТ

Представлены результаты обзора предметного поля по исследованиям цифровой трансформации экономических и социальных систем (часть II). Во второй части выполнен обзор и обоснованы основные теоретические средства, которые могут стать основой для разработки «деятельностной парадигмы» исследований.

Ключевые слова: цифровая трансформация, цифровая экономика, цифровая организация, цифровое общество, математическое моделирование, математические методы

Для цитирования: Гейда А. С., Гурьева Т. Н., Наумов В. Н. Концептуальные и математические модели, методы и технологии исследования цифровой трансформации экономических и социальных систем: обзор предметного поля (часть II) // Управленческое консультирование. 2021. № 12. С. 111–125.

Conceptual and Mathematical Models, Methods, and Technologies for the Study of the Digital Transformation of Economic and Social Systems: A Literature Review and Research Agenda (Part II)

Alexander S. Geyda^{1, 2, *}, Tatiana N. Gurieva¹, Vladimir N. Naumov¹

¹Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (North-West Institute of Management of RANEPa), Saint-Petersburg, Russian Federation; *geyda-as@ranepa.ru

²St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

The results of the review of the subject field on the research of the digital transformation of economic and social systems is carried out (part II). We reviewed main theoretical, mathematical tools which could allow solving unsolved problems. The review of such main theoretical tools that can become the basis for developing the “activity paradigm” of research is carried out.

Keywords: digital transformation, digital economy, digital organization, digital society, mathematical modeling, mathematical methods

For citing: Geyda A. S., Gurieva T. N., Naumov V. N. Conceptual and mathematical models, methods, and technologies for the study of the digital transformation of economic and social systems: a literature review and research agenda (Part II) // Administrative consulting. 2021. N 12. P. 111–125.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда развития научных исследований и прикладных разработок СЗИУ РАНХиГС.

Часть I настоящей статьи см.: Управленческое консультирование. 2021. № 11. С. 95–108.

Введение

Для дальнейшего уточнения вскрытых в части II несоответствий были выполнены дополнительные запросы последующих уровней к базе данных WoS по отдельным видам математических и информационных средств, теорий — в таких областях исследований, которые, предположительно, могут позволить описывать отношения между особенностями, характеристиками внедряемых новых (цифровых) технологий и возможными результатами деятельности (в разных ее аспектах) в производственных, экономических и социальных (обобщенно — в социетальных) системах, подвергающихся цифровой трансформации. Выбирались прежде всего те теоретические средства, модели, которые могут позволить описывать указанные связи математически. Затем, при необходимости, выполнялись дальнейшие уточняющие запросы. Основой для новых запросов было изучение полученных при предыдущих поисках источников.

В результате такого систематического использования многоуровневого библиометрического поиска получены следующие частные облака ключевых слов.

По формализмам, используемым для описания результатов использования ИТ, были изучены результаты поиска по KC: Complex Networks, Multilevel Networks, Network Science, Dynamic Networks, Probabilistic Graphical Models, Probabilistic Dynamic Networks, Agent Computing, Automata, Petri Net, Knowledge Graph, Action Theory, Activity Theory, Action Research, Game theory, Perturbation Theory, Complexity Science, Option Theory, Neural Networks, Belief Networks, Data Analysis, Digital Philosophy.

В результате был сделан вывод о том, что значительная (основная) часть указанных теорий предназначена для инструментальной поддержки реализации ИТ различных видов, а не для описания зависимостей между характеристиками ИТ и получаемыми при использовании ИТ результатами, т.е. не для аналитического моделирования результатов использования ИТ. Другими словами, основная часть исследованных теоретических аппаратов, моделей описывает то, как может быть устроена ИТ, а не прагматическую сторону использования ИТ в деятельности — т.е. то, как ИТ будет использоваться, какую пользу и почему может дать ИТ с заданными характеристиками в результате использования и к каким результатам деятельности это может привести.

Такие теоретические средства, как правило, позволяют создавать, конструировать информационные технологии в рамках предлагаемого теоретического, математического аппарата. Однако большинство из них не предназначены для концептуального и математического описания того, какие прагматические, практические результаты деятельности могут быть получены в результате использования той или иной технологии и какова количественная связь между характеристиками информационных технологий и результатами деятельности, а затем — и с мерой соответствия результатов требованиям к деятельности.

В связи с этим было реализовано дополнительное рекуррентное исследование источников литературы по ключевым словам, описывающим те теоретические средства, которые используются или по крайней мере могут быть использованы для исследования указанной прагматической стороны использования информационных технологий, т.е. исследование их внедрения в практику, затем использования на практике, формирования результатов их использования в результате деятельности и описания качества полученной в результате деятельности в зависимости от характеристик ИТ. Наиболее близкие к требуемым теоретическим средствам, согласно полученным результатам, теоретические средства, так или иначе основанные на исследовании роли информации и информационных технологий в деятельности в соответствии с «деятельностной парадигмой» исследований. К ключевым словам, относящимся к такой парадигме, относятся прежде всего Applied Activity Theories;

Systemic-Structural Activity Theory; Activity Theory; Action Theory; Action Research, Digital Philosophy.

Этот вывод связан с тем, что на основе «деятельностной парадигмы» принципиально возможно связать разные виды и разные аспекты деятельности — и прежде всего информационные виды деятельности, связанные с получением и преобразованием знаний, обучением, социумом и с психологией деятельности, и деятельности предметно-преобразующей, энергетически-материальной, инструментальной — по комплексу ее различных аспектов. Такие теоретические средства и необходимы, на наш взгляд, для решения задач, отмеченных ранее как нерешенные. Примеры использования «деятельностного подхода» для разных видов деятельности с использованием информации и информационных технологий представлены в [1; 2].

Следует отметить, что имеется значительное число (десятки и сотни) других теоретических средств, обзоры которых, исследования их распространенности и популярности, описания особенностей использования, статистические данные о публикационной активности и перспективы исследований приведены в [3–5]. Эти результаты использованы в статье, но здесь не приводятся в связи с ограниченностью объема статьи. Наш вывод по этим теоретическим средствам состоит в том, что большинство из них нацелено на один из аспектов использования информационных технологий. Например, как в наиболее популярной теории исследования информационных систем и технологий, TAM— Technology Acceptance Model [6–9] — на внедрение и принятие (adoption) информационной технологии пользователями — отдельный аспект деятельности с использованием ИТ. К другим теоретическим аппаратам, которые были проанализированы по результатам работы с источниками, относятся Information system success theory [10], Task technology fit model [7], Process virtualization theory [11], Deferred action theory [12], Resource-based view [13], Business value of information theory [14], Dynamic capability theory [15], Business Model Innovation Theory [16], Yield shield Theory [17], Theory of planned behavior [18], Digital innovation management [19], Technology activity theory [20].

Только некоторые из указанных теорий, а именно Deferred action theory и Technology activity theory, могут быть использованы в рамках «деятельностного подхода» как инструмент исследования системы аспектов деятельности, связанных с использованием ИТ.

При этом большинство из упомянутых и ряда других теорий, описанных, например, в [1; 2] и имеющих количественный характер, опираются на статистические исследования и экспертные данные, а не на прогнозные аналитические модели. Использование же «деятельностного подхода» должно позволить преодолеть несоответствие между необходимостью рассмотрения широкого комплекса аспектов использования информационных технологий математически, на основе прогнозных аналитических моделей и методов и отсутствием необходимых для этого моделей и методов.

«Деятельностный подход» («деятельностная парадигма») обладает значительно большей общностью в связи с тем, что основывается на описании деятельности в целом. Однако она не содержит, на момент написания нашей статьи, теоретических средств прогнозного аналитического оценивания деятельности, ее результатов, их соответствия требованиям — в зависимости от характеристик используемых информационных технологий. Ее математические инструменты на момент написания статьи, в основном ограничены средствами моделирования проектов и программ и отчасти — средствами проектного управления. Однако эти инструменты не описывают использование информационных технологий и связи между характеристиками ИТ и характеристиками реализуемой деятельности. Тем самым следует отметить, что теоретические инструменты «деятельностного подхода», с одной стороны, характеризуются междисциплинарностью и широтой, однако во многом

благодаря этому — лишены устоявшихся математических средств решения задач. Тем самым следует устранить два различных несоответствия, вызванных текущим состоянием теоретических средств решения задач использования информационных технологий в деятельности.

Во-первых, следует устранить несоответствие между необходимостью рассмотрения системы аспектов использования информационных технологий и имеющимися теоретическими средствами, описывающими, как правило, отдельные аспекты такого использования. Такое несоответствие может быть преодолено за счет системологического исследования деятельности, «деятельностного подхода», за счет раскрытия роли информации и информационных технологий в деятельности разных видов и в разных системах (вплоть до социетальных) [21]. Философские аспекты такого исследования рассматриваются в рамках «цифровой философии» [22]. Преодоление первого несоответствия должно позволить исследовать комплексы аспектов проявления использования информационных технологий, возможно — объединив ряд уже имеющихся теоретических результатов на основе «деятельностной», «системологической» и «цифрофилософской» парадигм исследования.

Во-вторых, следует устранить несоответствие между необходимостью использовать прогнозные математические средства исследования результатов деятельности в системах разного вида и отсутствием таких математических средств, позволяющих исследовать деятельность с учетом прогнозных математических зависимостей между характеристиками используемых информационных технологий, получаемых результатов деятельности и их соответствия требованиям к таким результатам. Представляется, что второе несоответствие (пробел в теоретических исследованиях) следует устранить, ориентируясь на практику использования существующих теоретических математических средств для решения аналогичных задач, определив перспективные математические средства и возможные пробелы в их использовании. Преодоление второго несоответствия должно позволить как осуществить прогнозное математическое моделирование требуемых зависимостей как отдельных сторон деятельности при тех или иных особенностях предметной области, так и выполнить комплексное математическое моделирование на основе «деятельностной», «системологической» и «цифрофилософской» парадигм.

Выполненные исследования позволили сделать заключение о том, что лишь незначительное число исследованных в найденных источниках теоретических средств позволяет описывать роль ИТ в деятельности, происходящие при использовании ИТ изменения деятельности, ее результаты и соответствие результатов требованиям. Тем не менее, исходя из анализа таких теоретических средств, можно сделать вывод о том, что перспективно использовать теоретические средства, описывающие возможную и действительную деятельность, переходы между этими видами деятельности в результате применения информационных технологий, изменения в характеристиках деятельности при использовании информационных технологий — с использованием алгебраических, логических, теоретико-графовых вероятностных (или возможных), в том числе порядка выше первого, а также лингвистических моделей.

Этот вывод определяется тем, что: деятельность удобно описывать конечными (дискретными) моделями; для отражения возможной и действительной деятельности следует использовать вероятностные (или возможные) модели; для описания использования информационных технологий необходимо описывать изменения действительной и возможной деятельности, их моделей, а также возможные последовательности действий и изменения отношений между моделями. Представляется, что вероятностные графовые (и прежде всего сетевые) помеченные модели деятельности, ее изменений, отображения графов и операции с помеченными графами, в том числе рекурсивно задаваемые, хорошие кандидаты на развитие для своего использования при моделировании деятельности во многих задачах, относящихся

к прикладной информатике как науке, предмет которой — практическое использование информационных технологий. Этот вывод подтверждается и практикой решения задач на основ диаграммных представлений деятельности — например, в системной инженерии [23]. Основные формализмы, которые, согласно выполненному исследованию источников уровней, последующих за первым, могут быть использованы для решения проблемы концептуального и на его основе формального исследования цифровой трансформации экономики и общества, приведены в табл.

Так, в рамках *теории деятельности (Activity Theory)* [21; 24; 25] устанавливаются комплексы связей между сознанием, информацией, субъектом и объектом деятельности, социумом, технологией и результатами деятельности. Выделяются различные виды действий — такие, как инструментальные, информационные. Разработана в рамках психологии и теории обучения. За счет использования теории деятельности возможно комплексное исследование проявлений использования информационных технологий в результатах деятельности разных видов. Однако формальный, математический аппарат теории развит недостаточно.

Теория действий (Action Theory) [26] рассматривает деятельность формализовано, основываясь на языках, описывающих состояния и переходы между ними (в том числе — недетерминированные).

Представляется, что в рамках этой теории возможно описание цепочек действий, меняющихся в зависимости от полученных сведений (информации). Теория основывается на формальном аппарате математической логики. Используются понятия законы действий (Action laws), причинные отношения (Causal Relationships), ограничения на состояния (State constraints), недопустимые действия (abnormal actions). Раскрывается ее близость со State Calculus и языкам описания состояний и переходов между ними.

Исследование действий (Action Research) описано [27–29] как состоящая из планирования действий (Action Planning), реализации действий (Action Taking). Показаны отношения с исчислением состояний (State Calculus). При этом, нового формализма описания действий и состояний не предложено. Описаны отношения с научными исследованиями в области разработки (Design Science Research). Показано, что действия следует рассматривать по изменениям, к которым они приводят. Такое видение близко к представлению информационных действий как действий, приводящих к изменениям [44] в других действиях. В связи с таким представлением результатов действий рассмотрены действия вида прямого вмешательства (Direct Interventions) и непрямого вмешательства (Indirect Interventions). Однако роль информационных действий отдельно от остальных действий не рассматривается. В связи с этим и не предложены формальные модели связи информационных и других действий. Теория не носит формализованный характер. Представляется, что в рамках этой теории возможно описание цепочек действий, меняющихся в зависимости от полученных сведений (информации), но для этого следует предпринять дополнительные исследования.

Стохастическое динамическое программирование, марковские процессы принятия решений, процессы принятия динамических решений (Dynamic Programming, Markov Decision Processes, Dynamic decision making) [33–35; 45] описывают случайные изменения состояний. Такие изменения реализуются в результате действий не только системы, но и в результате изменений среды — пусть даже не моделируемых явно. Используются формализмы обучения при принятии динамических решений, которые хорошо описаны математически — например, Reinforcement Learning, Instance-Based Learning Theory, Adaptive Control of Thought–Rational [45]. Представляется, что эти формализмы следует исследовать глубже и основываться на их результатах при разработке математических формализмов в рамках «деятельностной» и «системологической» парадигм с учетом механизмов обучения.

Основные формализмы, которые, по результатам исследования источников уровня более второго, могут быть использованы для решения проблемы концептуального и, на его основе, формального исследования цифровой трансформации экономики и общества

Table. Basic formalisms, which, according to the results of the study of sources of the level more than the second, can be used to solve the problem of conceptual and, on its basis, formal research of the digital transformation of the economy and society

Ссылка	Формализм	Математическое описание	Модели использования ИТ	Комплексная модель деятельности с ИТ
[21; 24; 25]	Activity Theory	Схемы деятельности	Концептуальные	Концептуальная
[26]	Action Theory	Математическая логика, языки, законы действий (Action laws) Причинные отношения — Causal Relationships State constraints Abnormal actions	Нет	Нет
[27–30]	Action Research	Actions Design Actions Taking Actions Planning	Нет, но возможно	Нет, но возможно
[31]	Complex Networks	Complex Networks Optimization Games on networks	Нет, но возможно	Нет, но возможно
[32]	Situation Calculus (Ситуационное Исчисление)	Situation calculus GOLOG	Нет, но возможно	Нет, но возможно
[33–35]	Процессы решений, динамическое программирование (Decision Processes, Dynamic Programming)	State Trees, Decision graphs	Нет, но возможно	Нет, но возможно
[36–40]	Динамические сети (Dynamic Networks)	Сложные сети, описывающие динамику изменений	Нет, но возможно	Нет, но возможно
[41]	Динамические отношения (Dynamic Relations)	Отношения, изменяющиеся во времени. Циклограммы. Языки, логика циклограмм	Нет, но возможно	Нет, но возможно

Ссылка	Формализм	Математическое описание	Модели использования ИТ	Комплексная модель деятельности с ИТ
[42; 43]	<i>Теория динамической сложности (Dynamic Complexity)</i>	<i>Математическая теория пертурбаций (Perturbation Theory), теория причинной деконструкции (Causal Deconstruction), теория эмулятивной деконструкции (Emulative Deconstruction), теории сингулярности и хаоса (Singularity and Chaos)</i>	Есть, как модели принятия решений в изменяющейся среде	Есть, как модели принятия решений в изменяющейся среде

Теория сложных сетей, сложных динамических сетей, управления сложными сетями (Complex Networks, Dynamic Networks, Control of complex networks). Указанные теоретические аппараты могли бы позволить преодолеть имеющиеся противоречия и описать зависимости характеристик информационных действий и получаемых результатов деятельности, а затем и мер соответствия получаемых результатов изменяющимся требованиям — в зависимости от характеристик информационных действий. Так, в [31] описаны методы оптимизации и управления сложными многоуровневыми сетями. Реализуется теоретико-игровое моделирование управления сложными сетями. К сожалению, роль информации и информационных действий в реализации действий не рассмотрена. Однако это может быть сделано за счет развития теоретического аппарата сложных сетей.

Теория динамических отношений (Theory of Dynamic Relations) [41] описывает, в том числе алгебраически (например, с использованием алгебры циклограмм, языка циклограмм) изменения отношений во времени. Тем самым, могут быть описаны и отношения, возникающие и изменяющиеся в результате реализации действий разных видов. Разрабатываемый в рамках теории динамических отношений математический аппарат целесообразно рассматривать в его отношениях с теорией сложных, а также динамических сетей [46; 47], сетей, состоящих из вложенных сетей [48], процессами принятия сложных решений [34], в том числе — динамических [45] и исследованием деятельности (action research, activity-theoretic research) [49], их отношениями с *системологией* [50]. При этом следует учесть объяснение роли информационных технологий в предметно-преобразующей деятельности в рамках теории отложенных действий (*Deferred Action Theory*) [51] и теории технологической деятельности *Technology activity theory* [20].

Математическая теория пертурбаций (Perturbation Theory), теория причинной деконструкции (Causal Deconstruction), теория эмулятивной деконструкции (Emulative Deconstruction), теории сингулярности и хаоса (Singularity and Chaos) объединены авторами [42; 43] в пул теории динамической сложности (*Dynamic Complexity*). Теория причинной деконструкции должна позволить теоретикам и практикам применять комплекс правил и ранее существовавших концепций для того, чтобы исследовать

и решить научную проблему, идентифицировать и объяснить наблюдаемые явления и выполнить анализ ситуации, прежде чем делать выводы, принимать меры по исправлению положения и находить решения. *Теория эмулятивной деконструкции* — это набор методов, правил и технологий, которые позволяют концептуальное, виртуальное и/или физическое разукрупнение (декомпозицию) конструкций в компоненты, строительные блоки, взаимозависимости, взаимодействия и затем — в описания динамики. По мнению авторов [42], это реализуется для того, чтобы понимать, предсказывать, реконструировать и оперировать улучшенными, трансформированными или инновационными структурами. *Теория сингулярности и хаоса* — математический аппарат, описывающий поведение некоторых нелинейных динамических систем, подверженных при определенных условиях явлению, известному как хаос [52]. Теория сингулярности — внезапные изменения в паттернах функционирования, поведения или условиях функционирования. В числе недостатков описанных теоретических аппаратов авторами указано на проблемы, которые должны, по мнению авторов, проявиться в будущем. В частности, это отсутствие методов и инструментов, позволяющих предсказывать и учитывать динамику, сложность и управлять сложностью, а также гибкостью, масштабируемостью, отсутствие методов учета целенаправленных изменений. На наш взгляд, этот вывод логичен и для преодоления указанного несоответствия необходимо развивать математический аппарат, позволяющий исследовать зависимости между характеристиками используемых информационных технологий, сложностью, изменениями деятельности и затем — ее результатами и соответствием этих результатов требованиям. При этом сами требования (как и информационные технологии, деятельность с их использованием, сложность деятельности и требований) следует также рассматривать в динамике. К сожалению, математических моделей и методов, позволяющих реализовать такое комплексное динамическое моделирование с учетом информационных и зависящих от них действий других видов, пока что не создано. В числе проблем, с которыми, по мнению авторов, уже сталкиваются предприятия, отсутствие формальных средств, позволяющих предсказать и управлять сложностью, постоянные изменения в восприятии из-за частичных управленческих решений, неадекватные требованиям предиктивные методы, не учитывающие изменений границ систем, отсутствие аналитических средств менеджмента, позволяющих учитывать изменения и планировать производственные мощности.

В [32] описано *ситуационное исчисление (Situation Calculus)*, методы моделирования действий, основанные на математической логике первого и второго порядков. В результате исследования ситуационного исчисления предложен язык GOLOG. В рамках ситуационного исчисления предложена формализация действий. Однако роль информации и информационных действий в реализации формализуемых действий не рассмотрена.

В [30] изучаются действия для реализации *программной инженерии в приложении к цифровой трансформации*. Авторы [53] указывают на пробел в исследовании *процессной инженерии (Process Engineering)* в приложении к цифровой трансформации. Их статья посвящена обзору препятствий на пути цифровой трансформации процессной инженерии и объяснения того, как эти препятствия могут преодолеваться. Указано, что процессная инженерия была, в основном, не вовлечена в процесс цифровой трансформации. Заметим, что вовлечение процессной инженерии как прикладной дисциплины в цифровую трансформацию имеет важнейшее значение для успешной практической реализации процессов цифровой трансформации с опорой на лучшие практики.

В развитие этих исследований в работе [54] введена *цифровая инженерия (Digital Engineering, DE)* как преемник системной инженерии (System Engineering) и, кроме того, преемник модельно-центричной инженерии (model centric engineering, MCE). Понятие о DE определено Министерством обороны США как комплексный цифро-

вой подход с использованием авторитетных источников данных о системах и моделях для систематической поддержки жизненного цикла систем от концепции до утилизации.

В работах [55–57] изучены различные аспекты цифровой инженерии. Описана роль доменно-ориентированных языков в моделировании (SysML), роль онтологий в цифровой инженерии и соответствующий цифровой семантический платформы (Digital Engineering Semantic Framework).

В руководящем документе Министерства обороны США [58] описана *трансформация на основе цифровой инженерии* в Министерстве обороны США. Цифровая трансформация рассмотрена при планировании, разработке и реализации изделий в Министерстве обороны США. Даны методические указания о такой трансформации, описаны используемые модели в рамках модельно-ориентированной системной инженерии (MBSE). Определены подходы к использованию цифровых ИТ и создаваемых с их помощью моделей на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ), роли участников трансформации, раскрыты возможные преимущества (benefits) от цифровой трансформации в МО США. К ним отнесены: лучшая информированность при принятии решений, лучшая коммуникация, лучшее понимание конструкции создаваемых систем (System Design), доверие к конструкции системы (Confidence in the System Design), эффективный процесс инжиниринга (efficient engineering process). Показано, что цифровая инженерия ведет к совершенствованию практических результатов системной инженерии и затем к улучшению потенциала систем (system capabilities).

В доктрине военно-морского ведомства США (Department of the Navy) *цифровая инженерия определена* как комплексный, основанный на расчетах подход, который использует авторитетные источники системных данных о системах и моделях для систематической поддержки жизненного цикла систем от концепции до утилизации. Однако математические модели, связывающие характеристики используемых ИТ, моделей — с одной стороны — и результатов использования изделий или предприятий не описаны в изученных источниках.

В обзоре [59] изучена *композиция моделей цифровой инженерии* в рамках MDE. В частности, выделены основные научные направления, связанные с композицией моделей при реализации цифровой инженерии с использованием MDE. Это — четыре основные группы исследований: в области модельно-ориентированного дизайна, аспектно-ориентированного программирования (*Aspect-oriented programming, AOP*), в области доменно-ориентированных языков моделирования и программирования (*Domain-Specific Languages, Domain-Specific Modelling Languages*), *коллаборативного программирования (Collaborative Programming)*, а также исследования в области объектно-ролевого подхода (Object Role Driven Approach). Заметим, что концепции моделирования зависимостей между характеристиками используемых ИТ и прогнозируемыми результатами деятельности предприятий, а затем и использования выпускаемых ими продуктов не предложено, что, на наш взгляд, характерно и для традиционной системной инженерии (System Engineering). В то же время указывается, что одними из важнейших результатов использования MDE является гибкость, устойчивость предприятий, возможность унификации, персонификации изделий, приспособленность изделий к модернизации. Тем не менее, указанные результаты несмотря на то, что они указаны, не измеряются на основе применения математического моделирования. Следует отметить, что в том случае, если бы такое моделирование было бы реализовано, стало бы возможным выбирать характеристики цифровых технологий и перейти фактически к синтезу цифровых технологий на основе разработанных моделей зависимостей результатов использования информационных технологий от их характеристик.

«Деятельностная парадигма», будучи системологической теорией, должна отражать взгляды ученых и на роль отражения, информации в мироздании, в устройстве все-

ленной. Так, в [60; 61] на основе концепции конструкторной теории информации (constructor theory of information, КТИ) и понятия о возможных и невозможных действиях (possible and impossible tasks) сформулированы действия как с материей, энергией, так и с информацией (практически — информационные действия, хотя, на наш взгляд, это действия, связанные с отражением), выполнена их классификация. Теория основана на конструкторной теории (КТ), описывающей основу всех физических явлений и позиционируемой как развитие квантовой теории. Под действиями понимаются абстрактные спецификации физической трансформации на субстрате, который трансформируется из одного физического атрибута в другой и представлен как множество упорядоченных пар входных и выходных атрибутов. Ключевым понятием становится невозможность действия и наличие нескольких возможностей его завершения. Действие невозможно, если законы физики запрещают его реализацию с произвольной точностью. Иначе действие возможно. КТ включает алгебру над действиями. Представляется, что это может позволить использовать ее результаты совместно с Action Science. В отличие от классической теории вычислений, где определения информации и вычислений выполнены как цикл, КТИ разрывает этот цикл и определяет информацию из вычислений (из алгебры действий информационного, вычислительного вида). В КТ имеется формальное определение знания. Это информация, которая действует как конструктор и вызывает саму себя остаться (отраженной) в физических субстратах. На наш взгляд, лучше разделять информацию и отражение. Отражение характерно для материального мира, но термин информация лучше закрепить за таким отражением, что реализуется человеком или для него. Заметим, что близкое понимание роли информации и моделей, с использованием которых следует описывать использование информации, характерно и для цифровой философии (Digital Philosophy) [22].

На наш взгляд, лучше различать знание и отражение в субстрате ранее отраженного, которое возможно и без людей. В соответствии с понятием отражения репликаторы, найденные в жизни, должны содержать все знания о том, как создавать и поддерживать себя. Указано, что классификация действий (вычислений) и соответственно — видов информации, в КТИ не полна. Тем не менее, выделены и формализованы действия вида копирования (copying), различения и измерения (distinguishability, measurement), bar operation, предсказания (X-Predictor). X-предиктор используется для определения непредсказуемости (Как того, для сего нет X-предиктора). Вводятся понятия наблюдаемого (observable), суперинформации (superinformation) как информации о всевозможных и невозможных действиях. Такое исследование, на наш взгляд, близко представлению о functional domain [62]. Информация связывается с различимостью (distinguishability), и для нее требуется наличие по крайней мере двух возможностей завершения действия. Различимость определяется на основе возможности действий, которые могут преобразовать атрибуты субстрата в клонируемую информационную переменную.

КТ определяет интероперабельность (interoperability) как возможные задачи, которые комбинируют информацию с двух информационных субстратов. Входная переменная определяется как измеримая (measurable), когда существует возможное действие, которое преобразует вход с исходного субстрата в информационный субстрат. Подготовка (preparation) действует, наоборот, в том смысле, что подготовка означает, что существует возможное действие, которое преобразует информацию и генерирует физическое воплощение в физическом субстрате. Тем самым информационные действия (понимаемые в КТИ как вычисления) имеют вид действий в квантовом, физическом смысле. При этом, на наш взгляд, важно, что человек и автоматизированные устройства (например, роботы) при реализации действий осуществляют как информационные, так и другие (материальные, неинформационные) действия в различных последовательностях и с разными харак-

теристиками, данных ему свободой воли. За счет этого получают разные возможные результаты действий.

Обсуждение результатов

Гипотезы исследований в целом подтвердились. Ответы на основные исследовательские вопросы получены. Найдены пробелы в теоретических аспектах исследования результатов использования цифровизации в деятельности разного вида. При этом, существующие наработки позволяют надеяться на то, что эти пробелы могут быть заполнены. При этом имеется пул перспективных исследований по вскрытой в работе тематике. К этому пулу относятся теории, описывающие теории динамических способностей, теорию технологий деятельности, теории потенциала систем, теории отложенных действий, условно отнесенные к «деятельностной парадигме».

Имеются фундаментальные теории (конструктивная теория, цифровая философия), также условно относящиеся к «деятельностной парадигме» и развитие которых должно позволить описать роль информационных технологий в деятельности разных видов.

В качестве формальных математических аппаратов таких теорий обоснованы теории вероятностных графов, сложных динамических графов, вложенных графов, динамическое программирование, теоретико-графовые и алгебраические модели состояний, переходов между состояниями в результате действий различной природы, модели теории динамических решений — в том числе, модели порядков выше первого.

Прикладные дисциплины, изучающие практики — такие, как цифровая инженерия и модельно-ориентированная цифровая инженерия, должны позволить проще и научно обоснованно перейти к практике организации использования информационных технологий на основе получаемых результатов.

Полученная синтетическая теория, включающая элементы указанных теорий и практик — с учетом причинно-следственных связей между комплексами действий информационных видов (может быть несколько) и предметно-преобразующих видов (тоже может быть несколько) может, на наш взгляд, служить основой для преодоления вскрытых несоответствий.

При этом основная сложность разработки такой теории, на наш взгляд, заключается в описании математических закономерностей связей между разными видами действий. В частности, такое описание может потребовать описания отображений (в том числе, динамических) между действиями одного вида (например, информационными) и действиями других видов (например, материально-энергетического вида). Такая необходимость может вести к построению моделей действий высших порядков (по крайней мере, выше первого) — например, в соответствии с концепцией теории отложенных действий. Следует отметить, что указанные в качестве элементов синтетической теории составные части — ориентировочны и «синтетический» теоретический аппарат может включать и другие, пока неизвестные элементы.

Заключение

Аналитическое прогнозное исследование прагматических сторон деятельности в соответствии с описанными в статье теоретическими инструментами «деятельностной парадигмы», с учетом использования информационных технологий в деятельности разных видов, должно позволить решить комплекс задач исследования использования информационных технологий в деятельности на основе математических моделей и методов. «Деятельностная парадигма» должна позволить описать деятельность как

возможные последовательности причинно-следственных связей между разумной деятельностью человека, социумом, культурой и создаваемыми людьми технологиями, реализуемыми в том числе за счет использования информационных действий, и результатами действий предметно-преобразующих, вызываемых разумной деятельностью человека. Результат такого описания должен позволить строить математические модели разнообразных аспектов деятельности, аналогично тому, как за счет дифференциального и интегрального исчисления описывают математические модели разнообразных аспектов природных явлений.

На основе такой парадигмы должно стать возможным связать разные аспекты деятельности — и прежде всего информационные ее аспекты, связанные с получением и преобразованием знаний, обучением, обменом информацией, организацией, в том числе социальной, с психологией деятельности и познания, с человеческим языком и комплексом предметно-преобразующих аспектов деятельности: энергетических, материальных, инструментальных. Такие математические средства в результате выполненного исследования описаны в общих чертах. Их развитие и использование может позволить решать комплекс задач, которые в результате выполненного обзора были определены как нерешенные.

Литература/References

1. Karanasios S. Framing ICT4D Research Using Activity Theory: A Match between the ICT4D Field and Theory? // *Information Technologies & International Development*. 2014. Vol. 10. N 2. P. 1–17.
2. Barthelme P. A View of Software Development Environments Based on Activity Theory / P. Barthelme, K. M. Anderson // *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*. 2002. Vol. 11. N 1–2. P. 13–37.
3. Theories Used in Information Systems Research: Identifying Theory Networks in Leading IS Journals / Sanghee Lim, T. Saldanha, Suresh Malladi, Nigel P. Melville : ICIS, 2009.
4. Lai P.C. The literature review of technology adoption models and theories for the novelty technology // *Journal of Information Systems and Technology Management*. 2017. 14(1):21–38.
5. Uncovering the Intellectual Core of the Information Systems Discipline / Sidorova, Evangelopoulos, Valacich, Ramakrishnan // *MIS Quarterly*. 2008. Vol. 32. N 3. P. 467.
6. Cheung R. Predicting user acceptance of collaborative technologies: An extension of the technology acceptance model for e-learning / R. Cheung, D. Vogel // *Computers & Education*. 2013. Vol. 63. N 2. P. 160–175.
7. Predicting the acceptance of MOOCs in a developing country: Application of task-technology fit model, social motivation, and self-determination theory / I.U. Khan, Z. Hameed, Y. Yu at al. // *Telematics and Informatics*. 2018. Vol. 35. N 4. P. 964–978.
8. Ma Q. The Technology Acceptance Model / Q. Ma, L. Liu // *Advanced Topics in End User Computing, Volume 4* / ed. S. Clarke M. A. Mahmood : IGI Global, 2005. P. 112–128.
9. Marangunić N. Technology acceptance model: a literature review from 1986 to 2013 / N. Marangunić, A. Granić // *Universal Access in the Information Society*. 2015. Vol. 14, N 1. P. 81–95.
10. Urbach N. The Updated DeLone and McLean Model of Information Systems Success / N. Urbach, B. Müller // *Information Systems Theory* / ed. Y.K. Dwivedi, M. R. Wade, S. L. Schneberger. New York : Springer New York, 2012. P. 1–18.
11. Thomas M. Assessing the role of IT-enabled process virtualization on green IT adoption / M. Thomas, D. Costa, T. Oliveira // *Information Systems Frontiers*. 2016. Vol. 18, N 4. P. 693–710.
12. Patel N. V. The Theory of Deferred Action: Purposive Design as Deferred Systems for Emergent Organisations // *Information Systems Theory* / ed. Y.K. Dwivedi, M. R. Wade, S. L. Schneberger. New York : Springer New York, 2012. P. 125–149.
13. Kor Y.Y. Edith Penrose's (1959) Contributions to the Resource-based View of Strategic Management / Y.Y. Kor, J.T. Mahoney // *Journal of Management Studies*. 2004. Vol. 41. N 1. P. 183–191.
14. Dong J.Q. Business value of big data analytics: A systems-theoretic approach and empirical test / J. Q. Dong, C.-H. Yang // *Information & Management*. 2020. Vol. 57. N 1. P. 103–124.

15. Sustainability as a dynamic organizational capability: a systematic review and a future agenda toward a sustainable transition / L. B. L. Amui, C. J. C. Jabbour, A. B. L. de Sousa Jabbour, D. Kannan // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 142. N 6. P. 308–322.
16. Parida V. Reviewing Literature on Digitalization, Business Model Innovation, and Sustainable Industry: Past Achievements and Future Promises / V. Parida, D. Sjodin, W. Reim // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. N 2. P. 391.
17. Briggs R. O. The yield shift theory of satisfaction and its application to the IS/IT domain / R. O. Briggs, B. A. Reinig, G. J. de Vreede // *Journal of the Association for Information Systems*. 2008. Vol. 9. N 5. P. 267–293.
18. Ajzen I. The theory of planned behaviour: reactions and reflections // *Psychology & health*. 2011. Vol. 26. N 9. P. 1113–1127.
19. Digital Innovation Management: Reinventing Innovation Management Research in a Digital World / S. Nambisan, K. Lyytinen, A. Majchrzak, M. Song // *MIS Quarterly*. 2017. Vol. 41. N 1. P. 223–238.
20. Karanasios S. Toward a unified view of technology and activity // *Information Technology & People*. 2018. Vol. 31. N 1. P. 134–155.
21. Sannino A. Cultural-historical activity theory: founding insights and new challenges / A. Sannino, Y. Engeström // *Cultural-Historical Psychology*. 2018. Vol. 14. N 3. P. 43–56.
22. Fredkin E. An Introduction to Digital Philosophy // *International Journal of Theoretical Physics*. 2003. Vol. 42. N 2. P. 189–247.
23. Aslaksen E. W. The System Concept and Its Application to Engineering. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013.
24. Igira F. T. Cultural Historical Activity Theory / F. T. Igira, J. Gregory // *Handbook of Research on Contemporary Theoretical Models in Information Systems* / ed. Y. K. Dwivedi, B. Lal, M. D. Williams, S. L. Schneberger. M. Wade : IGI Global, 2009. P. 434–454.
25. Allen D. Working with activity theory: Context, technology, and information behavior / D. Allen, S. Karanasios, M. Slavova // *Journal of the American Society for Information Science and Technology*. 2011. Vol. 62. N 4. P. 776–788.
26. Challenges for Action Theories / G. Goos, J. Hartmanis, J. van Leeuwen, M. Thielscher. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2000.
27. Piovesan F. Reflections on combining action research and actor-network theory // *Action Research*. 2020. Vol. 3. N 2. 147675032091916.
28. Dick B. Theory in action research / B. Dick, E. Stringer, C. Huxham // *Action Research*. 2009. Vol. 7. N 1. P. 5–12.
29. Gustavsen B. Action research, practical challenges and the formation of theory // *Action Research*. 2008. Vol. 6. N 4. P. 421–437.
30. Staron M. Action Research in Software Engineering. Cham : Springer International Publishing, 2020.
31. Lozovanu D. D. Optimization and multiobjective control of time-discrete systems / D. D. Lozovanu, S. Pickl. Berlin : Springer, 2009.
32. Reiter R. Knowledge in action. Cambridge, Mass. : MIT Press, 2001.
33. Lizotte D. J. Multi-Objective Markov Decision Processes for Data-Driven Decision Support / D. J. Lizotte, E. B. Laber // *Journal of machine learning research*. 2016. Vol. 17.
34. Complex decisions made simple: a primer on stochastic dynamic programming / L. Marescot, G. Chapron, I. Chadès at al. // *Methods in Ecology and Evolution*. 2013. Vol. 4. N 9. P. 872–884.
35. Hinderer K. Dynamic optimization / K. Hinderer, U. Rieder, M. Stieglitz. Cham, Switzerland : Springer, 2016.
36. Dynamics on and of complex networks III / F. Ghanbarnejad, R. Saha Roy, F. Karimi at al. Cham, Switzerland : Springer, 2019.
37. Barrat A. Dynamical Processes on Complex Networks / A. Barrat, M. Barthlemy, A. Vespignani. Leiden : Cambridge University Press, 2008. 367 p.
38. Fu X. Propagation dynamics on complex networks / X. Fu, M. Small, G. Chen. Chichester : Wiley / Higher Education Press, 2014.
39. Quax R. SEECN: simulating complex systems using dynamic complex networks / R. Quax, D. A. Bader, P. M. A. Slood // *International Journal for Multiscale Computational Engineering*. 2011. Vol. 9. N 2. P. 201–214.
40. Zinilli A. Competitive project funding and dynamic complex networks: evidence from Projects of National Interest (PRIN) // *Scientometrics*. 2016. Vol. 108. N 2. P. 633–652.
41. Rashid A. Dynamic Relationships in Object Oriented Databases: A Uniform Approach / A. Rashid, P. Sawyer // *Database and Expert Systems Applications* / ed. G. Goos, J. Hartmanis at al. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1999. P. 26–35.

42. Abu el Ata N. Solving the Dynamic Complexity Dilemma / N. Abu el Ata, M.J. Perks. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014.
43. Grösser S.N. Complexity Management and System Dynamics Thinking // Dynamics of Long-Life Assets: From Technology Adaptation to Upgrading the Business Model / ed. S.N. Grösser, A. Reyes-Lecuona, G. Granholm. Cham : Springer International Publishing, 2017. P. 69–92.
44. Geyda A. Modeling of Information Operations Effects: Technological Systems Example / A. Geyda, I. Lysenko // Future Internet. 2019. Vol. 11. N 3. P. 62.
45. Gonzalez C. Dynamic Decision Making: Learning Processes and New Research Directions / C. Gonzalez, P. Fakhari, J. Busemeyer // Human factors. 2017. Vol. 59. N 5. P. 713–721.
46. Chen G. Fundamentals of complex networks / G. Chen, X. Wang, X. Li. Chichester : Wiley-Blackwell, 2015.
47. Nestedness in complex networks: Observation, emergence, and implications / M. S. Mariani, Z.-M. Ren, J. Bascompte, C.J. Tessone // Physics Reports. 2019. Vol. 813. N 1. P. 1–90.
48. Synchronization on complex networks of networks / R. Lu, W. Yu, J. Lu, A. Xue // IEEE transactions on neural networks and learning systems. 2014. Vol. 25. N 11. P. 2110–2118.
49. Engeström, Y. From mediated actions to heterogeneous coalitions: four generations of activity-theoretical studies of work and learning / Y. Engeström, A. Sannino // Mind, Culture, and Activity. 2021. Vol. 28. N 1. P. 4–23.
50. Stichweh R. Systems Theory as an Alternative to Action Theory? The Rise of 'Communication' as a Theoretical Option // Acta Sociologica. 2000. Vol. 43. N 1. P. 5–13.
51. Patel N.V. Deferred Action: Theoretical Model of Process Architecture Design for Emergent Business Processes / N.V. Patel, R. Simons. 2011. 29 c.
52. Malinetsky G. G., Potapov A. B., Podlazov A. V. Nonlinear dynamics: Approaches, results, hopes. URSS, 2016. 280 p. / (Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б., Подлазов А. В. Нелинейная динамика: Подходы, результаты, надежды. URSS, 2016. 280 с.) (In Rus).
53. Jung N. The Role of Process Engineering in the Digital Transformation // 30th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Elsevier, 2020. P. 721–726.
54. Transforming systems engineering through digital engineering / M.A. Bone, M.R. Blackburn, D.H. Rhodes at all. // The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology. 2019. Vol. 16. N 4. P. 339–355.
55. Digitization Driven Design A Guideline to Initialize Digital Business Model Creation / T. Greff, C. Neu, D. Johann, D. Werth // Business Modeling and Software Design / ed. B. Shishkov. Cham : Springer International Publishing, 2018. P. 308–318.
56. Kitchenham B. A systematic review of systematic review process research in software engineering / B. Kitchenham, P. Brereton // Information and Software Technology. 2013. Vol. 55. N 12. P. 2049–2075.
57. Walczowski L. T. A Digital Engineering Curriculum for the New Millennium / L. T. Walczowski, K. R. Dimond, W.A. J. Waller // The International Journal of Electrical Engineering & Education. 2000. Vol. 37. N 1. P. 108–117.
58. Digital engineering strategy // Department of Defense Office report of the Deputy Assistant Secretary, JUNE 2018. P. 1–36.
59. Abouzahra A. Model composition in Model Driven Engineering: A systematic literature review / A. Abouzahra, A. Sabraoui, K. Afdel // Information and Software Technology. 2020. Vol. 125. N 12. P. 106316.
60. Marletto C. Constructor theory of probability / C. Marletto // Proceedings. Mathematical, physical, and engineering sciences. 2016. Vol. 472. N 2192. Article: 20150883.
61. Deutsch D. Constructor theory // Synthese. 2013. Vol. 190. N 18. P. 4331–4359.

Об авторах:

Гейда Александр Сергеевич, доцент кафедры бизнес-информатики Северо-Западного института управления РАНХиГС (Санкт-Петербург, Российская Федерация), кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН; geyda-as@ranepa.ru;

Гурьева Татьяна Николаевна, доцент кафедры бизнес-информатики Северо-Западного института управления РАНХиГС (Санкт-Петербург, Российская Федерация), кандидат технических наук, доцент; gureva-tn@ranepa.ru

Наумов Владимир Николаевич, заведующий кафедрой бизнес-информатики Северо-Западного института управления РАНХиГС (Санкт-Петербург, Российская Федерация), доктор военных наук, кандидат технических наук, профессор; naumov-vn@ranepa.ru

About the authors:

Alexander S. Geyda, Associate Professor of the Business Informatics Department of North-West Institute of Management, Branch of RANEPA (St. Petersburg, Russian Federation), PhD in Technical Science, Associate Professor, Senior Researcher of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation; geyda-as@ranepa.ru.

Taiana N. Gurieva, Associate Professor of the Business Informatics Department of North-West Institute of Management, Branch of RANEPA (St. Petersburg, Russian Federation), PhD in Technical Science, Associate Professor; gureva-tn@ranepa.ru

Vladimir N. Naumov, Head of the Business Informatics Department of North-West Institute of Management, Branch of RANEPA (St. Petersburg, Russian Federation), Doctor of Science, Professor; naumov-vn@ranepa.ru