

Анализ и прогнозирование динамики цифровой трансформации экономики Российской Федерации *(на примере оценки цифровизации деятельности организаций)*

**Павел Эдуардович Прохоров,
Виталий Григорьевич Минашкин**

Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва, Россия

Внедрение цифровых технологий в учетно-управленческую деятельность организаций является важным инструментом трансформации экономической системы на современном этапе новейшей промышленно-технологической революции. В настоящее время нет однозначного представления о методологическом аппарате для описания состояния и перспектив развития цифровой трансформации. Анализ объективных закономерностей цифровой трансформации российской экономики может быть осуществлен на основе построения математико-статистических моделей, позволяющих проанализировать стадии цифровой зрелости в прошлом и определить развитие прогнозируемых явлений цифровизации в будущем.

Цель статьи – статистический анализ и прогнозирование динамики показателей цифровой трансформации деятельности организаций. Количественная оценка цифровой трансформации была осуществлена на основе показателей, характеризующих применение информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в организациях, а именно: наличия подключения к Интернету, наличия веб-сайта, использования Интернета для заказа товаров и услуг, применения программных средств класса ERP, CRM, SCM. Одним из распространенных инструментов моделирования тенденций технологического развития являются кривые роста. Для каждого временного ряда осуществлен расчет теоретических значений и оценена точность по четырем моделям кривых роста: Гомперца, Вейбулла, логистической и лог-логистической.

С точки зрения практического применения предложенный в данном исследовании подход может быть полезен при оценке тенденций использования ИКТ в организациях различного типа (в зависимости от вида экономической деятельности и размера) в целях адекватной характеристики цифровой зрелости и дальнейших перспектив цифровой трансформации экономики Российской Федерации.

Ключевые слова: цифровизация экономики, цифровые технологии, цифровая трансформация, математико-статистическое моделирование, кривые роста, использование ИКТ в организациях, модель Гомперца, прогнозирование.

JEL: C22, C53, O33.

doi: <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2021-28-4-107-120>.

Для цитирования: Прохоров П.Э., Минашкин В.Г. Анализ и прогнозирование динамики цифровой трансформации экономики Российской Федерации *(на примере оценки цифровизации деятельности организаций)*. Вопросы статистики. 2021;28(4):107–120.

Analysis and Forecasting Dynamics of Digital Transformation of Economy of the Russian Federation *(on the Example of the Measurement of the Organization's Digital Performance)*

**Pavel E. Prokhorov,
Vitaly G. Minashkin**

Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

The introduction of digital technologies in the monitoring and management activities of organizations is an important tool for the transformation of economic system at modern phase of the latest industrial and technological revolution. Currently, there is no unified methodological apparatus for describing the state and development prospects of digital transformation. The analysis of objective patterns of the digital transformation of the Russian economy can be carried out by constructing mathematical and statistical models that make it possible to analyze the stages of digital maturity in the past and to determine the future development of projected digital phenomena.

The purpose of this article lies in modelling and forecasting of dynamics of digital transformation of the activities of organizations. Digital transformation was measured based on indicators of the use of information and communication technologies in organizations, namely: Internet connection, website, purchase of goods and services via the Internet, use of software tools of the ERP, CRM, SCM class. Growth curves are one of the most common tools for modeling technological development trends. For each time series, the accuracy of four models of growth curves was assessed: the Gompertz, Weibull's, logistic and log-logistic.

The practical application of this study is that the proposed approach can be used to assess trends in ICT diffusion in organizations by type of economic activity and by size to obtain a more complete characterization of digital maturity and further prospects for digital transformation of the Russian economy.

Keywords: digitalization of the economy, digital technologies, digital transformation, mathematical and statistical modeling, growth curves, use of ICT in organizations, Gompertz model, forecasting.

JEL: C22, C53, O33.

doi: <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2021-28-4-107-120>.

For citation: Prokhorov P.E., Minashkin V.G. Analysis and Forecasting Dynamics of Digital Transformation of Economy of the Russian Federation (on Example of the Measurement of the Organization's Digital Performance). *Voprosy Statistiki*. 2021;28(4):107–120. (In Russ.)

Введение

Актуальность цифровой трансформации экономики как объекта исследования заключается в интенсивно возрастающих масштабах воздействия цифровых технологий на хозяйственную деятельность. Под влиянием стремительного развития цифровых технологий происходят коренные изменения в экономической системе [1]. Подробный анализ эффектов внедрения цифровых технологий и их влияния на бизнес-процессы организаций представлен в работах [2–4].

Несмотря на повышенный интерес к цифровой трансформации, единый подход к определению этого понятия на данный момент отсутствует. Результаты исследований, в которых производился обзор различных вариантов определения данной концепции, например в работах [5 и 6], дают основания полагать, что под цифровой трансформацией понимается инновационная деятельность, осуществляемая посредством внедрения цифровых технологий в целях увеличения эффективности деятельности организации.

Описание объективных закономерностей цифровой трансформации российской экономики может быть осуществлено на основе построения статистических моделей, позволяющих проанализировать стадии цифровой зрелости в прошлом и определить развитие цифровизации в будущем. Одним из распространенных инструментов моделирования тенденций технологического развития являются кривые роста.

В предыдущих исследованиях моделирование технологического развития в Российской Федерации при помощи кривых роста осуществля-

лось на основе показателей, характеризующих динамику развития телекоммуникационных услуг. В работах Л.Л. Делицына производилось моделирование и прогнозирование динамики числа пользователей Интернета по возрастным группам [7], а также распространения мобильной связи в домашних хозяйствах по модели Басса [8]. В исследованиях [9 и 10] осуществлялось моделирование потенциальной емкости рынка передачи данных с учетом смены поколений интернет-связи (коммутируемой и широкополосной связи) при помощи моделей Лотки – Вольтерра и Гилпина – Айала. В статье [11] представлены результаты моделирования и прогнозирования развития мобильных технологий в странах БРИК по модели Басса. А.В. Дубовцев и М.Б. Ермолаев в своей статье представили результаты прогнозирования развития рынка мобильной связи на основе различных модификаций логистических функций и модели Гомперца [12]. В исследованиях [13 и 14] анализировалась эффективность кривых роста (логистической функции, моделей Гомперца и Басса) и их расширенных модификаций для прогнозирования динамики числа абонентов мобильной связи в Российской Федерации. В исследовании А.В. Трачука и Н.В. Линдер [15] модель Басса использовалась для моделирования и прогнозирования технологий электронного бизнеса по двенадцати отраслям экономики. В работах зарубежных исследователей построение моделей динамики технологического развития на основе роста также осуществлялось по показателям, отражающим распространение коммуникационного оборудования, бытовой электроники, персональных компьютеров, раз-

личных стандартов мобильного Интернета, цифрового телевидения, облачных сервисов и развития электронной торговли [16–18].

Кривые роста широко используются как инструмент моделирования и прогнозирования динамики показателей, характеризующих сферу ИКТ, что подтверждено в рассматриваемых исследованиях. Однако применение кривых роста для моделирования и прогнозирования тенденций в сфере ИКТ в трудах отечественных и зарубежных исследователей ограничено показателями развития Интернета и мобильной связи. Очевидно, что данные показатели лишь частично отражают процесс цифровой трансформации экономики. Как было показано в перечисленных выше исследованиях, цифровая трансформация представляет собой комплексное понятие, для количественной оценки которого требуется система взаимосвязанных индикаторов.

1. Концептуально-методологические основы моделирования и прогнозирования цифровой трансформации деятельности организаций

В качестве индикаторов цифровой трансформации в данном исследовании были использованы показатели, характеризующие возможность подключения к сети Интернет в организациях, наличие корпоративного веб-сайта, размещение организациями заказов на товары и услуги через глобальную сеть, а также использование программных средств, обеспечивающих автоматизированное управление бизнес-процессами.

Выбор данных показателей обусловлен следующим. Основной целью внедрения цифровых технологий является повышение эффективности осуществления внешних и внутренних бизнес-процессов [19]. Реализация преимуществ от использования современных информационных и коммуникационных технологий требует наличия в организации стабильного высокоскоростного доступа в Интернет [2]. Вместе с тем в условиях развития цифровой экономики Интернет выступает в качестве не только средства коммуникации и информационного ресурса, но и источника массивов и потоков данных, обла-

дающих коммерческой ценностью, а также инфраструктуры для осуществления новых видов экономической деятельности, в том числе для онлайн-торговли, социальных сетей, экономики совместного использования и прочих инновационных бизнес-моделей.

Оценка цифровой зрелости по уровню вовлеченности организаций в электронную торговлю, с одной стороны, отражает доступность онлайн-рынков, а с другой — способность компаний использовать преимущества, предоставляемые интернет-торговлей. Веб-сайт выступает в качестве ключевого узла интернет-инфраструктуры и используется для размещения, хранения, сбора информации и ее обмена в глобальной сети.

Возрастающий объем коммерческой информации и ценность массивов данных при принятии управленческих решений стимулируют автоматизацию бизнес-процессов организации. Применение специализированных программных средств класса ERP, CRM, SCM¹ направлено на автоматизацию учетных операций и комплексного администрирования бизнес-процессов организации, управления взаимодействием с потребителями и логистики [19].

Что касается моделей кривых роста, которые способны адекватно отразить динамику рассматриваемых явлений, то для этой задачи были выбраны следующие модели: Гомперца, Вейбулла, логистическая и лог-логистическая.

Одним из достоинств этого семейства кривых роста является то, что на основе параметров моделей можно идентифицировать стадии развития исследуемых процессов и явлений, а именно характеристики интенсивности роста и предельных значений насыщения [16]. С точки зрения сопоставимой интерпретации выходных параметров наибольший интерес вызывают модели, построенные на основе экспоненциальных функций, такие как логистическая модель и модель Гомперца [20]. Модификациями экспоненциальных функций являются логарифмические функции (лог-логистическая функция и модель Вейбулла) [20]. Эти модели обладают теми же свойствами, что и соответствующие им экспоненциальные функции: логистические модели

¹ ERP-, CRM- и SCM-системы — программные средства класса ERP (англ. Enterprise Resource Planning — планирование ресурсов предприятия), CRM (англ. Customer Relationship Management — управление взаимоотношениями с клиентами), SCM (англ. Supply Chain Management — управление цепочками поставок).

симметричны по отношению к точке перегиба функции, в то время как модели Гомперца и Вейбулла асимметричны относительно этого значения. Однако по сравнению с экспоненциальными моделями логарифмическим модификациям свойственен более плавный прирост в фазе насыщения. По этой причине лог-логистическая модель и модель Вейбулла могут обладать высоким качеством аппроксимации временных рядов с менее интенсивным характером роста.

Важным этапом построения прогноза является определение числа параметров в логистической модели и модели Гомперца, поскольку модели одного и того же типа при разном количестве параметров могут давать разные результаты для одних и тех же временных рядов [21]. Одними из наиболее распространенных модификаций являются двух-, трех- и четырехпараметрические экспоненциальные функции. Модели с четырьмя параметрами используются для моделирования временных рядов, в которых фаза начального роста может быть определена уровнем значительно больше нуля [21]. К таким временным рядам из числа рассматриваемых относятся уровень использования Интернета, наличие веб-сайта и размещение заказов на товары и услуги онлайн. Значение уровня использования систем CRM, ERP и SCM в начале рассматриваемого периода составляет около 3%, что достаточно близко к нулю. По этой причине в случае моделирования данного показателя при помощи четырехпараметрических моделей кривых роста может возникнуть ситуация, при которой параметр нижней асимптоты может быть незначимым. В таких условиях целесообразно принять решение об исключении данного параметра и применении трехпараметрических модификаций рассматриваемых моделей.

Для всех моделей, представленных в таблице 1, параметры уравнений могут быть охарактеризованы следующим образом:

- $\hat{Y}_t$ – теоретические уровни временного ряда;
- x – значение шкалы ($x = 1, 2, \dots, n$), характеризующее период времени;
- a – значение x в точке перегиба функции;
- b – коэффициент роста значений функции;
- c – нижняя асимптота (граница начальной фазы роста);
- d – верхняя асимптота (предел насыщения);
- e – число Эйлера.

Таблица 1

Модели кривых роста с четырьмя параметрами

Модель	Формула
Гомперца	$\hat{Y}_t = c + (d - c) \cdot e^{-e^{b(x-a)}}$
Логистическая	$\hat{Y}_t = c + \frac{d - c}{1 + e^{b(x-a)}}$
Вейбулла	$\hat{Y}_t = c + (d - c) \cdot e^{b(\ln(x) - \ln(a))}$
Лог-логистическая	$\hat{Y}_t = c + \frac{d - c}{1 + e^{b(\ln(x) - \ln(a))}}$

Значения шкалы x соответствуют периодам времени, по которым имеются эмпирические данные. Динамика всех приведенных показателей представлена за период 2003–2019 гг. Тогда первый уровень на шкале x соответствует 2003 г., второй – 2004 г. и т. д. Параметр a представляет собой значение параметра x в точке перегиба графика функции и влияет на смещение кривой роста относительно оси абсцисс. По значению параметра a может быть определен период времени, в котором произошло изменение характера тенденции временного ряда. Параметр b характеризует скорость приближения теоретических уровней временного ряда от начального уровня до предела насыщения и влияет на наклон графика функции. Теоретические уровни временного ряда и асимптоты функций выражаются в тех же единицах измерения, что и эмпирические значения анализируемых показателей. Асимптоты функций характеризуют область допустимых значений кривой роста, ограниченную снизу значением начальной фазы роста (параметр c), а сверху – пределом насыщения (параметр d). Графически параметры верхних и нижних пределов (c и d) задают прямые, которые не пересекаются с теоретическими значениями кривой роста ($\hat{Y}_t$). При $c = 0$ функции сводятся к трехпараметрическим.

Построение прогнозных значений показателей цифровой трансформации экономики по моделям кривых роста включает следующие этапы:

- 1) оценка параметров четырех рассматриваемых моделей для каждого временного ряда;
- 2) оценка значимости моделей в целом и параметров моделей в частности;
- 3) сравнительный анализ показателей качества и выбор наилучшей модели для прогнозирования динамики каждого временного ряда;
- 4) оценка точечного прогноза и построение 95%-го доверительного интервала прогноза на период упреждения, равного пяти уровням.

Оценка параметров моделей осуществлялась в программной среде *R* на основе алгоритма Гаусса — Ньютона. Проверка значимости параметров кривых роста производилась на основе *t*-критерия Стьюдента, проверка значимости полученных моделей в целом — на основе *F*-критерия Фишера — Снедекора. В целях сравнительного анализа адекватности каждой расчетной модели оценка точности моделей производилась на основе среднеквадратической ошибки (СКО), средней относительной ошибки (СОО), информационных критериев Акаике (AIC) и Шварца (BIC), скорректированного квадрата парного коэффициента корреляции (R^2_{adj}).

Таким образом, целью данного исследования является моделирование и прогнозирование тенденций цифровой трансформации экономики Российской Федерации. В ходе исследования проверяются следующие гипотезы:

1) кривые роста являются эффективным инструментом для моделирования и прогнозирования цифровой трансформации российской экономики;

2) динамика уровня использования Интернета в организациях находится в фазе насыщения роста;

3) существует потенциал роста показателей, характеризующих наличие веб-сайта, участие в электронной торговле и внедрение систем автоматизации бизнес-процессов.

Информационной базой исследования является официальная статистическая информация, формируемая по итогам федерального статистического наблюдения 3-информ «Сведения об использовании информационных и коммуникационных технологий и производстве вычислительной техники, программного обеспечения и оказании услуг в этих сферах» Федеральной службы государственной статистики. Показатели представлены в годовой периодичности за 2003–2019 гг.²

2. Моделирование динамики цифровой трансформации деятельности российских организаций за 2003–2019 гг.

2.1. Моделирование динамики показателя удельного веса организаций, использующих Интернет.

Как было отмечено выше, глобальная сеть Интернет является ключевым элементом развития цифровой экономики. Интернет-технологии стимулировали создание и развитие электронных ресурсов, связанных с осуществлением коммерческой деятельности. Интенсивность цифровой трансформации напрямую зависит от наличия доступа к интернет-сети в организациях, качества подключения корпоративной ИТ-инфраструктуры к глобальной сети, а также от скорости обмена данными между хозяйствующими субъектами. Поэтому на начальном этапе моделирования динамики цифровой трансформации деятельности организаций первоочередной задачей является анализ динамики распространения Интернета с точки зрения масштабов доступа к базовой технологии цифровизации бизнес-процессов, связанных с осуществлением коммуникаций и торговых операций в электронном виде посредством веб-сайта, а также с автоматизацией учетных и управленческих операций с использованием соответствующего программного обеспечения.

В результате расчета параметров четырех моделей кривых роста были получены прогнозные значения уровней ряда динамики показателя удельного веса организаций, использующих Интернет. На основе полученных расчетных значений по каждой из моделей была определена основная тенденция и дальнейшая траектория развития изучаемого процесса, а также уровни динамики, которые соответствуют точке перегиба и пределу насыщения.

Так, предел насыщения динамики данного показателя по параметрам четырех рассматриваемых моделей был определен на уровне около 90%. Наиболее адекватные исследуемой динамике оценки точки перегиба и предела роста дают параметры модели Гомперца (см. таблицу 2).

Таблица 2

Параметры модели Гомперца для динамики показателя удельного веса организаций, использующих Интернет

Модель	Критерий значимости модели	Характеристика параметров	Параметр			
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Гомперца	$F_{набл} = 2422,99 > F_{кр} = 3,41$ $v_1 = 3$ $v_2 = 13$ $\alpha = 0,05$	Оценка	3,77	–0,39	41,27	90,51
		$t_{набл}$	22,92	–19,95	28,31	233,95
		p-уровень значимости	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

² Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/14478>.

Судя по рассчитанным характеристикам точности для удельного веса организаций, использующих Интернет, модель Гомперца обладает высоким качеством аппроксимации эмпирических значений ряда динамики (см. таблицу 3).

Таблица 3

Характеристики точности модели Гомперца для динамики показателя удельного веса организаций, использующих Интернет

Показатель	Значения
СКО (в процентных пунктах — п. п.)	0,66
СОО (в процентах)	0,64
AIC	43,86
BIC	48,03
R^2_{adj} (в процентах)	99,78

Величины показателей ошибок малы, в среднем прогнозные значения отличаются от эмпирических всего на 0,6–0,9%. Тем не менее приведенные характеристики точности дают основания полагать, что из всех рассматриваемых моделей модель Гомперца обладает лучшим качеством аппроксимации исходной информации.

2.2. Моделирование динамики показателя удельного веса организаций, имеющих веб-сайт. Произведенные вычисления позволили получить теоретические значения динамики показателя удельного веса организаций, имеющих веб-сайт. В отличие от динамики распространения Интернета в организациях динамика удельного веса организаций, имеющих веб-сайт, имеет иной характер развития во времени.

Динамика рассматриваемого показателя не достигла фазы насыщения. Темпы прироста в период 2015–2019 гг. практически не отличаются от темпов прироста за 2010–2015 гг. Таким обра-

зом, в России имеется существенный потенциал роста показателя удельного веса организаций, имеющих веб-сайт. Это также подтверждается значениями данного показателя в других странах. Так, например, удельный вес организаций, которые имеют корпоративный веб-сайт, в среднем по странам Европейского союза в 2019 г. составил 78%, что почти в полтора раза превышает текущий уровень данного показателя в Российской Федерации.

Данные особенности рассматриваемого временного ряда осложняют определение на основе кривых роста гипотетической тенденции и продолжительности фазы насыщения временного ряда в будущем. Согласно параметрам моделей Гомперца, Вейбулла и логистической функции предел насыщения определяется на уровне 55–60%. Эта характеристика значительно выше (67%) по параметру лог-логистической модели. Параметры модели Вейбулла и лог-логистической модели определяют точку перегиба функции при $x \approx 12$, что соответствует 2014 г. В свою очередь тенденция теоретических значений модели Гомперца изменяется при $x \approx 8$, логистической модели — при $x \approx 9$, что соответствует 2010 и 2011 гг.

Таким образом, лог-логистическая функция может рассматриваться как модель, которая лучше соответствует динамике рассматриваемого явления, что подтверждается обозначенными выше объективными факторами.

Полученные параметры лог-логистической модели представлены в таблице 4. Значение F-критерия Фишера — Снедекора свидетельствует о значимости модели в целом. Согласно t-критерию Стьюдента параметры модели являются значимыми.

Таблица 4

Параметры лог-логистической модели для динамики показателя удельного веса организаций, имеющих веб-сайт

Модель	Критерий значимости модели	Характеристика параметров	Параметр			
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Лог-логистическая	$F_{набл} = 366,48 > F_{кр} = 3,41$ $v_1 = 3$ $v_2 = 13$ $\alpha = 0,05$	Оценка	11,62	–2,33	13,67	67,29
		$t_{набл}$	5,85	–4,78	10,17	6,46
		p-уровень значимости	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

По характеристикам адекватности наилучшей оказалась модель Гомперца. Однако характеристики точности лог-логистической функции свидетельствуют о ее качестве, сопоставимом с качеством модели Гомперца. Это подтвержда-

ется значениями средних ошибок прогноза: теоретические значения лог-логистической функции в среднем на 3,84% отличаются от фактических значений уровней ряда динамики, по кривой Гомперца — на 3,83%. Среднеквадрати-

ческие ошибки по модели Гомперца и лог-логистической модели равны и составляют 1,40 п. п. Информационные критерии Акаике и Шварца отличаются на десятки доли величины, а скорректированные коэффициенты детерминации приблизительно равны 98,60% (см. таблицу 5).

Таблица 5

Характеристики точности лог-логистической модели для динамики показателя удельного веса организаций, имеющих веб-сайт

Показатель	Значения
СКО (п. п.)	1,40
СОО (в процентах)	3,84
AIC	69,73
BIC	73,89
R^2_{adj} (в процентах)	98,56

Таким образом, в случае моделирования динамики показателя удельного веса организаций, имеющих веб-сайт, выбор наилучшей модели осложняется из-за отсутствия фактической информации о наступлении фазы насыщения. Данные особенности учитывались в ходе принятия решения о выборе наилучшей модели для построения прогноза показателя удельного веса организаций, имеющих веб-сайт. Как известно, условием для расчета теоретических значений кривых роста является медленное затухание прироста на конечном участке временного ряда, поэтому тен-

денция рассматриваемого временного ряда лишь гипотетически может быть описана при помощи кривых роста. Вместе с тем исходя из предположения о неизменности интенсивности роста показателя в ближайшей перспективе, была отобрана модель, адекватно описывающая динамику показателя удельного веса организаций, имеющих веб-сайт, на представленном ретроспективном участке. Выбор лог-логистической функции в качестве наилучшей модели также подтверждается характеристиками точности, что подчеркивает соответствие теоретических значений текущей тенденции развития исследуемого явления.

2.3. Моделирование динамики показателя удельного веса организаций, использующих Интернет для заказа товаров и услуг. Наблюдаемые значения динамики уровня использования Интернета для заказа товаров и услуг свидетельствуют о соответствии временного ряда S-образному закону развития, что подтверждает корректность применения кривых роста для прогнозирования тенденции рассматриваемого показателя. Параметры всех четырех моделей значимы. Точка перегиба функции определена в периоде 2005–2007 гг., а предел насыщения – на уровне 42–44%. По характеристикам адекватности наилучшей оказалась модель Вейбулла (см. таблицу 6).

Таблица 6

Параметры модели Вейбулла для динамики показателя удельного веса организаций, использующих Интернет для заказа товаров и услуг

Модель	Критерий значимости модели	Характеристика параметров	Параметр			
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Вейбулла	$F_{набл} = 338,12 > F_{кр} = 3,41$ $v_1 = 3$ $v_2 = 13$ $\alpha = 0,05$	Оценка	7,11	2,72	13,24	42,41
		$t_{набл}$	29,82	7,49	11,17	71,49
		p-уровень значимости	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Теоретические значения кривых роста в удовлетворительной степени описывают общие закономерности рассматриваемого временного ряда. Наблюдаются существенные отклонения эмпирических значений от теоретических, полученных по кривым роста, вследствие циклической вариации временного ряда. В период между 2012 и 2013 г., равно как и в период между 2009 и 2010 г., прослеживаются изменения основного направления развития явления, что сказывается на качестве аппроксимации моделей. В связи с затухающим характером динамики значений

показателя, наблюдаемых в 2013–2019 гг., динамика прогнозных уровней временного ряда в последующие периоды демонстрирует практически полное отсутствие роста.

В целом можно заключить, что построенные модели обладают высоким уровнем аппроксимации фактических уровней динамики показателя удельного веса организаций, использующих Интернет для заказа товаров и услуг, что также подтверждается характеристиками точности.

Согласно характеристикам точности прогнозных значений, все четыре модели адекватно

описывают динамику анализируемого показателя на ретроспективном участке временного ряда (см. таблицу 7).

Таблица 7

Характеристики точности модели Вейбулла для динамики показателя удельного веса организаций, использующих Интернет для заказа товаров и услуг

Показатель	Значения
СКО (п. п.)	1,24
СОО (в процентах)	3,74
AIC	65,61
BIC	69,78
R^2_{adj} (в процентах)	98,44

Судя по величине средней относительной ошибки, модели обладают высокой точностью аппроксимации основной тенденции временного ряда. Модель Вейбулла и логистическая модель сопоставимы по значениям характеристик точности. При этом в качестве модели для прогнозирования показателя предпочтительнее выглядит модель Вейбулла по причине меньших величин информационных критериев и среднеквадратической ошибки прогноза.

2.4. Моделирование динамики показателя удельного веса организаций, использующих CRM-, ERP- и SCM-системы. Применение моделей с четырьмя параметрами в случае расчета теоретических значений динамики показателя удельного веса организаций, использующих CRM-, ERP-

и SCM-системы, нецелесообразно, поскольку параметр c , отражающий значение нижней асимптоты в рассматриваемых моделях, статистически незначим по причине близости к нулю. Поэтому расчет теоретических значений производился по трем параметрам в каждой модели — a , b и d . Таким образом, динамика теоретических значений, полученная по трехпараметрическим моделям, предполагает принадлежность начальных величин модели области отрицательных значений. Тем не менее благодаря такому допущению можно добиться того, что все три параметра рассматриваемых моделей динамики будут значимы.

Полученные характеристики параметров модели свидетельствуют о следующем. Два из трех параметров модели Вейбулла и лог-логистической модели незначимы. Параметры модели Гомперца и логистической функции значимы на пятипроцентном уровне значимости. С учетом тенденции анализируемого показателя адекватной является оценка предела насыщения, полученная по логистической модели, на уровне 34%. Оценка верхней асимптоты по модели Гомперца является завышенной и составляет 89%, что не соответствует текущей тенденции развития исследуемого явления. Таким образом, логистическая модель является наиболее предпочтительной для моделирования и прогнозирования уровня использования средств автоматизированного управления бизнес-процессами в организации (см. таблицу 8).

Таблица 8

Параметры логистической модели для динамики показателя удельного веса организаций, использующих CRM-, ERP- и SCM-системы

Модель	Критерий значимости модели	Характеристика параметров	Параметр		
			a	b	c
Логистическая	$F_{набл} = 692,59 > F_{кр} = 3,74$ $v_1 = 2$ $v_2 = 14$ $\alpha = 0,05$	Оценка	14,62	−0,18	34,12
		$t_{набл}$	8,17	−10,18	6,18
		p-уровень значимости	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Следует отметить, что степень соответствия фактическим уровням временного ряда существенно различается между значениями, полученными по рассматриваемым моделям кривых роста. Теоретические значения модели Гомперца сильно завышают оценку дальнейшего внедрения программных средств автоматизации бизнес-процессов в деятельность организаций. Прогнозные значения, полученные по модели Вейбулла и лог-логистической модели, совпадают на всем рассматриваемом участке;

прослеживается занижение прогнозных значений в начале периода. Прогнозные значения, полученные по логистической модели, адекватно отражают основную тенденцию временного ряда.

Выбор логистической модели в качестве приоритетной подтверждается характеристиками ее точности (см. таблицу 9). Оценки характеристик минимальны для логистической модели. Второй по качеству аппроксимации является модель Гомперца.

Таблица 9

Характеристики точности логистической модели для динамики показателя удельного веса организаций, использующих CRM-, ERP- и SCM-системы

Показатель	Значения
СКО (п. п.)	0,58
СОО (в процентах)	5,94
AIC	37,70
BIC	41,03
R^2_{adj} (в процентах)	98,86

В случае моделирования тенденции использования CRM-, ERP- и SCM-систем в российских организациях исключение четвертого параметра из моделей позволило обеспечить адекватное теоретическое описание динамики рассматриваемого показателя. Однако лишь некоторые трехпараметрические модификации кривых роста отвечали необходимому уровню качества. К ним относятся модель Гомперца и логистическая модель, построенные на основе экспоненциальных функций. В свою очередь это свидетельствует об ограниченности применения логарифмических функций для моделирования подобных временных рядов в силу неудовлетворительного качества аппроксимации.

2.5. Сравнительный анализ результатов моделирования динамики показателей использования ИКТ в организациях.

В итоге среди четырех рассматриваемых кривых роста для каждого из показателей была отобрана наилучшая модель. Для динамики показателя удельного веса организаций, использующих Интернет, наилучшей моделью стала кривая Гомперца; удельного веса организаций, имеющих веб-сайт, — лог-логистическая модель; удельного веса организаций, использующих Интернет для размещения заказов на товары и услуги, — кривая Вейбулла; удельного веса организаций, использующих CRM-, ERP- и SCM-системы, — логистическая модель с тремя параметрами.

Для каждого показателя по соответствующим параметрам функций были определены аналитические характеристики. По параметру точки перегиба был установлен год, в котором произошло изменение тенденции. По параметру верхней асимптоты был найден предел насыщения. На основе теоретических величин предела насыщения и уровня ряда динамики за 2019 г. было рассчитано отношение, значение которого отражает перспективу дальнейшего роста показателя. Чем ближе значение данного индикатора к 100%, тем меньше различий между теоретическим значением за 2019 г. и прогнозным пределом насыщения (см. таблицу 10).

Таблица 10

Характеристики моделей динамики показателей использования ИКТ в организациях

ИКТ	Лучшая модель	Количество параметров	Год, в котором произошло изменение тенденции	Предел насыщения (в процентах)	Отношение прогнозного значения в 2019 г. к пределу насыщения (в процентах)
Интернет	Гомперца	4	2006	90,51	99,71
Веб-сайт	Лог-логистическая	4	2014	67,29	76,78
Размещение заказов онлайн	Вейбулла	4	2009	42,41	100,00
CRM-, ERP- и SCM-системы	Логистическая	3	2015	34,12	60,82

Обобщая результаты, полученные на этапе моделирования динамики показателей использования ИКТ в организациях, можно заключить следующее. Прямой взаимосвязи между характером динамики временных рядов и определенным видом кривых роста не выявлено. В большинстве рассмотренных случаев все виды моделей с высокой точностью аппроксимируют исходные эмпирические данные. Периоды, в которых произошло изменение величин цепных приростов, по каждому из показателей различаются: переход в фазу менее интенсивного

роста уровня использования Интернета в организациях начался в 2006 г., уровня использования Интернета для размещения заказов на товары и услуги — в 2009 г. Динамика этих показателей достигла фазы насыщения. Динамика уровня использования веб-сайта и CRM-, ERP- и SCM-систем далека от фазы насыщения: ежегодные темпы прироста теоретических значений модели начали уменьшаться с 2014 и 2015 гг. соответственно, а теоретические значения показателей в 2019 г. составляли 77 и 61% от величины предела насыщения.

3. Прогнозирование цифровой трансформации деятельности организаций

Для прогнозирования динамики показателей использования ИКТ в организациях были использованы отобранные на предыдущем этапе модели для каждого временного ряда. Ниже представлены точечные и интервальные оценки прогнозных значений показателей на пятилетний период упреждения. Прогнозирование тенденции временных рядов позволяет получить теоретические значения на будущие периоды и проанализировать дальнейшую траекторию развития явления по каждому из представленных показателей. На основе прогноза количественных показателей использования ИКТ в органи-

зациях были получены выводы об интенсивности и перспективах цифровой трансформации до 2024 г.

По данным таблицы 11 наблюдается соответствие направления динамики прогнозных оценок показателя удельного веса организаций, использующих Интернет, полученных по модели Гомперца, фазе затухающего роста. Цепные темпы роста в период 2020–2024 гг. планомерно уменьшаются до 0,02%. Интенсивного расширения доверительного интервала на периоде упреждения не наблюдается. Согласно точечному прогнозу, значение показателя увеличится к 2024 г. на 0,25% по сравнению с уровнем, достигнутым в 2019 г., и с вероятностью 95% будет находиться в пределах от 88,67 до 92,29%.

Таблица 11

Точечные и интервальные оценки прогнозных значений показателя удельного веса организаций, использующих Интернет, полученные по модели Гомперца, в 2019–2024 гг.

Год	Оценка точечного прогноза (п. п.)	Нижняя граница доверительного интервала прогноза (п. п.)	Верхняя граница доверительного интервала прогноза (п. п.)	Цепной темп роста прогнозных значений (в процентах)	Базисный темп роста прогнозных значений (в процентах)
2019	90,25	88,47	92,03	—	—
2020	90,34	88,55	92,12	100,10	100,10
2021	90,39	88,60	92,19	100,06	100,16
2022	90,43	88,63	92,24	100,04	100,20
2023	90,46	88,65	92,27	100,03	100,23
2024	90,48	88,67	92,29	100,02	100,25

В отличие от предыдущего показателя прогноз динамики наличия веб-сайтов в организациях свидетельствует о более высокой скорости увеличения на периоде упреждения. На этапе моделирования было определено, что динамика уровня наличия веб-сайтов имеет потенциал к росту в последующие периоды, что выражается в полученных по лог-логистической модели прогнозных значениях. Согласно

прогнозу, удельный вес организаций, имеющих в наличии веб-сайт, возрастет с 52 до 57% в 2019–2024 гг. Таким образом, к 2024 г. произойдет увеличение показателя на 11% по сравнению с уровнем 2019 г. Судя по доверительному прогнозному интервалу, с вероятностью 95% теоретические значения показателя будут находиться в промежутке между 50 и 66% (см.таблицу 12).

Таблица 12

Точечные и интервальные оценки прогнозных значений показателя удельного веса организаций, имеющих веб-сайт, полученные по лог-логистической модели, в 2019–2024 гг.

Год	Оценка точечного прогноза (п. п.)	Нижняя граница доверительного интервала прогноза (п. п.)	Верхняя граница доверительного интервала прогноза (п. п.)	Цепной темп роста прогнозных значений (в процентах)	Базисный темп роста прогнозных значений (в процентах)
2019	51,66	47,43	55,89	—	—
2020	53,10	48,42	57,77	102,78	102,78
2021	54,37	49,15	59,60	102,40	105,25
2022	55,51	49,66	61,36	102,09	107,45
2023	56,52	50,00	63,05	101,82	109,41
2024	57,43	50,21	64,64	101,60	111,16

Согласно теоретическим значениям модели Вейбулла, динамика показателя удельного веса организаций, использующих Интернет для размещения заказов на товары и услуги, достигла предела роста. Поэтому как точечные, так и интервальные прогнозные значения существенно не увеличиваются. Таким образом, точечный прогноз по модели Вейбулла на период 2020–2024 гг. составляет 42,41%, нижняя граница 95%-го доверительного интервала – 39,09%, верхняя граница – 45,74%.

В предположении соответствия характера динамики показателя S-образному закону развития полученный по логистической модели про-

гноз отражает высокий потенциал дальнейшей автоматизации бизнес-процессов в российских компаниях. Согласно точечной оценке прогноза, в 2020–2024 гг. уровень использования в организациях программных средств класса CRM, ERP, SCM увеличится почти на треть от уровня 2019 г. и достигнет 27,16%. Интервальная оценка прогноза на 2024 г. лежит в пределах от 22,84 до 31,49%. При условии достоверной оценки точки перегиба и предела роста, которые были получены на основе логистической модели, в последующие годы цепные темпы прироста показателя будут уменьшаться с 7 до 4% (см. таблицу 13).

Таблица 13

Точечные и интервальные оценки прогнозных значений показателя удельного веса организаций, использующих CRM-, ERP- и SCM-системы, полученные по логистической модели, в 2019–2024 гг.

Год	Оценка точечного прогноза (п. п.)	Нижняя граница доверительного интервала прогноза (п. п.)	Верхняя граница доверительного интервала прогноза (п. п.)	Цепной темп роста прогнозных значений (в процентах)	Базисный темп роста прогнозных значений (в процентах)
2019	20,75	19,04	22,47	—	—
2020	22,22	20,19	24,25	107,06	107,06
2021	23,61	21,14	26,08	106,24	113,75
2022	24,90	21,87	27,92	105,47	119,97
2023	26,09	22,43	29,74	104,77	125,69
2024	27,16	22,84	31,49	104,13	130,89

Результаты моделирования показателей использования ИКТ в организациях доказывают, что российские организации достигли базового уровня цифровой зрелости. Теоретические значения, полученные по кривым роста, свидетельствуют о том, что в ближайшей перспективе существенного прироста уровня использования Интернета в организациях, в том числе в коммерческих целях, не произойдет ввиду достижения фазы насыщения. Полученные данные подтверждают результаты предшествующих исследований, посвященных моделированию и прогнозированию числа абонентов сети Интернет. Потенциал роста, выражаемый через отношение прогнозного значения показателя в 2019 г. к величине предела насыщения, по показателям, характеризующим наличие веб-сайта и использование CRM-, ERP- и SCM-систем, реализован на 77 и 61% соответственно. В связи с этим в ближайшие пять лет ожидается увеличение показателя удельного веса организаций, имеющих корпоративный веб-сайт, на 11%; организаций, использующих системы автоматизации бизнес-процессов, — на 31%. При этом согласно параметрам соответствующих мо-

делей ежегодные приросты данных показателей имеют тенденцию к постепенному уменьшению с 2014 и 2015 гг. соответственно.

Таким образом, перспективы цифровой трансформации российских организаций на ближайшие годы будут заключаться в дальнейшем наращивании присутствия организации в глобальной сети, увеличении каналов взаимодействия с потребителями через веб-сайт и обмене информацией и данными с внешней средой в электронном виде, а также в ускорении автоматизации внутренних бизнес-процессов, связанной с внедрением специализированного программного обеспечения.

Заключение

В исследовании представлены результаты моделирования и прогнозирования динамики уровня использования ИКТ в организациях. На основе параметров выбранных моделей была осуществлена оценка ключевых характеристик, отражающих тенденции цифровой трансформации российской экономики.

В ходе работы был принят ряд допущений, основными из которых являются следующие: перспективы цифровой трансформации и текущее состояние цифровой зрелости экономики могут быть охарактеризованы на основе показателей использования ИКТ в организациях; тенденции развития рассматриваемых явлений во времени подчиняются S-образному закону, что является предпосылкой для осуществления моделирования и прогнозирования показателей использования ИКТ в организациях на основе кривых роста; в целях повышения качества аппроксимации исходных данных модели должны содержать параметр, характеризующий нижний предел, что позволит более точно определить теоретические значения моделей в начале рассматриваемого периода. В ходе практического расчета параметров моделей и проверки значимости параметров было установлено, что допущение относительно количества параметров в моделях неверно в случае моделирования динамики использования CRM-, ERP- и SCM-систем ввиду статистической незначимости параметра, характеризующего нижнюю асимптоту.

При проведении исследования была подтверждена гипотеза об эффективности кривых роста для моделирования и прогнозирования процессов цифровой трансформации экономики. Также подтвердилась гипотеза о характере динамики уровня использования Интернета в организациях. Гипотеза об имеющемся потенциале роста показателей, характеризующих наличие веб-сайта, участие в электронной торговле и внедрение систем автоматизации бизнес-процессов подтверждена частично, поскольку теоретические значения показателя динамики уровня использования Интернета для размещения заказов на товары и услуги свидетельствуют о достижении фазы насыщения роста.

Данное исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, для оценки тенденций цифровой трансформации российской экономики был использован достаточно узкий круг показателей. Во-вторых, фактические данные представлены за 2003–2019 гг., что может смещать оценки параметров моделей, полученных на основе коротких временных рядов. В-третьих, моделирование и прогнозирование показателей осуществлялось на основе одного типа моделей — кривых роста, в то время как в ряде исследований, посвященных изучению тенденций технологического раз-

вития, наряду с кривыми роста используются модели авторегрессии (в частности, скользящего среднего и модели экспоненциального сглаживания).

С точки зрения практического применения предложенный в данном исследовании подход может быть полезен при оценке тенденций использования ИКТ в различных типах организаций (в зависимости от видов экономической деятельности и размера) в целях более полной характеристики цифровой зрелости и дальнейших перспектив цифровой трансформации экономики Российской Федерации.

Литература

1. **Horlach B.** et al. Increasing the Agility of IT Delivery: Five Types of Bimodal IT Organization // Proc. of the Hawaiian Int. Conf. on System Sciences. Hawaii, USA: 2017. doi: <https://doi.org/10.24251/HICSS.2017.656>.
2. **Andrews D., Nicoletti G., Timiliotis C.** Digital Technology Diffusion: A Matter of Capabilities, Incentives or Both? // OECD Economics Department Working Papers, No. 1476. Paris: OECD Publ., 2018. doi: <https://doi.org/10.1787/7c542c16-en>.
3. **Schallmo D., Williams C.A., Boardman L.** Digital Transformation of Business Models — Best Practice, Enablers, and Roadmap // International Journal of Innovation Management. 2017. Vol. 21. No. 08. P. 104–121. doi: <https://doi.org/10.1142/S136391961740014X>.
4. **Stjepić A., Ivančić L., Vugec D.S.** Mastering Digital Transformation Through Business Process Management: Investigating Alignments, Goals, Orchestration and Roles // Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation. 2020. Vol. 16. Iss. 1. P. 41–74. doi: <https://doi.org/10.7341/20201612>.
5. **Henriette E., Feki M., Boughzala I.** The Shape of Digital Transformation: A Systematic Literature Review // MCIS 2015 Proceedings. Samos, Greece, 2015. URL: <https://aisel.aisnet.org/mcis2015/10>.
6. **Morakanyane R., Grace A., O'Reilly P.** Conceptualizing Digital Transformation in Business Organizations: A Systematic Review of Literature // A. Pucihar et al. (eds). Digital Transformation — From Connecting Things to Transforming Our Lives. Proc. of the 30th Bled eConference, June 18–21, 2017, Bled, Slovenia. Maribor: University of Maribor Press, 2017. P. 427–443. doi: <https://doi.org/10.18690/978-961-286-043-1.30>.
7. **Делицын Л.Л.** Прогнозирование распространения Интернета при помощи модели диффузии нововведений // Информатика, телекоммуникации и управление. 2010. № 1(93). С. 74–82.
8. **Делицын Л.Л.** Моделирование данных социологических опросов о распространении мобильной связи в России // Информатика, телекоммуникации и управление. 2009. № 1(72). С. 97–105.

9. Кузнецов Ю.А., Маркова С.Е., Мичасова О.В. Экономико-математическое моделирование динамики смены поколений телекоммуникационных услуг // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2014. Т. 7. Вып. 34. С. 43–55.

10. Вильданов В.К. и др. Имитационное моделирование процесса замещения технологий // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. 2016. № 1. С. 9–15.

11. Kumar A. et al. Diffusion of Mobile Communications: Application of Bass Diffusion Model to BRIC Countries // Journal of Scientific and Industrial Research. 2007. Vol. 66. No. 4. P. 312–316.

12. Дубовцев А.В., Ермолаев М.Б. Прогнозирование развития рынка мобильной связи на основе S-образных моделей // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2010. № 4(24). С. 39–41.

13. Balash V. et al. Comparative Analysis of Innovation Diffusion Models: Empirical Results and Predictive Performance on Russian Mobile Phone Propagation Data // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1564. P. 12–27. (International Conference on Mathematical Models & Computational Techniques in Science & Engineering 22–24 February 2020, London, UK). doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1564/1/012027>.

14. Sidorov S. et al. Extended Innovation Diffusion Models and Their Empirical Performance on Real Propagation Data // Journal of Marketing Analytics. 2021. Vol. 9. Iss. 1. P. 99–110. doi: <https://doi.org/10.1057/s41270-021-00106-x>.

15. Трачук А.В., Линдер Н.В. Распространение инструментов электронного бизнеса в России: результаты

эмпирического исследования // Российский журнал менеджмента. 2017. № 1. С. 27–50. doi: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu18.2017.102>.

16. Adamuthe A.C., Thampi G.T. Forecasting Technology Maturity Curve of Cloud Computing with its Enabler Technologies // Journal of Scientific Research. 2020. Vol. 64. Iss. 2. P. 239–246. doi: <https://doi.org/10.37398/JSR.2020.640233>.

17. Schilling M.A., Esmundo M. Technology S-curves in Renewable Energy Alternatives: Analysis and Implications for Industry and Government // Energy Policy. 2009. Vol. 37. Iss. 5. P. 1767–1781. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.01.004>.

18. Sudtasan T., Mitomo H. Comparison of Diffusion Models for Forecasting the Growth of Broadband Markets in Thailand // Conf. Paper 14th Asia-Pacific Regional Conference of the International Telecommunications Society (ITS): «Mapping ICT into Transformation for the Next Information Society», 24th–27th June, 2017, Kyoto, Japan. Kyoto: 2017.

19. Probst L. et al. Digital Transformation Scoreboard 2018. EU Businesses go Digital: Opportunities, Outcomes and Uptake. Luxembourg: Publ. Office of the European Union, 2018. doi: <https://doi.org/10.2826/821639>.

20. Meadea N., Islam T. Forecasting in Telecommunications and ICT – A Review // International Journal of Forecasting. 2015. Vol. 31. Iss. 4. P. 1105–1126. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2014.09.003>.

21. Akin E. et al. Parameter Identification for Gompertz and Logistic Dynamic Equations // PLoS ONE. 2020. 15(4):e0230582. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230582>.

Информация об авторах

Прохоров Павел Эдуардович – научный сотрудник научной лаборатории «Количественные методы исследования регионального развития», Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова. 117997, Москва, Стремянный переулок, д. 36. E-mail: prohovor.pe@rea.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1503-2326>.

Минашкин Виталий Григорьевич – д-р экон. наук, профессор, проректор Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 117997, Москва, Стремянный переулок, д. 36. E-mail: Minashkin.VG@rea.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6494-8672>.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-310-90067.

References

1. Horlach B. et al. Increasing the Agility of IT Delivery: Five Types of Bimodal IT Organization. In: *Proc. of the Hawaiian Int. Conf. on System Sciences*. Hawaii, USA: 2017. Available from: <https://doi.org/10.24251/HICSS.2017.656>.

2. Andrews D., Nicoletti G., Timiliotis C. Digital Technology Diffusion: A Matter of Capabilities, Incentives or Both? *OECD Economics Department Working Papers*, No. 1476. Paris: OECD Publ.; 2018. Available from: <https://doi.org/10.1787/7c542c16-en>.

3. Schallmo D., Williams C.A., Boardman L. Digital Transformation of Business Models – Best Practice, Enablers, and Roadmap. *International Journal of Innovation Management*. 2017;21(08):104–121. Available from: <https://doi.org/10.1142/S136391961740014X>.

4. Stjepić A., Ivančić L., Vugec D.S. Mastering Digital Transformation Through Business Process Management: Investigating Alignments, Goals, Orchestration and Roles. *Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation*. 2020;16(1):41–73. Available from: <https://doi.org/10.7341/20201612>.

5. **Henriette E., Feki M., Boughzala I.** The Shape of Digital Transformation: A Systematic Literature Review. In: *MCIS 2015 Proceedings*. Samos, Greece; 2015. Available from: <https://aisel.aisnet.org/mcis2015/10>.
6. **Morakanyane R., Grace A., O'Reilly P.** Conceptualizing Digital Transformation in Business Organizations: A Systematic Review of Literature. In: Pucihar A. et al. (eds) *Digital Transformation – From Connecting Things to Transforming Our Lives. Proc. of the 30th Bled eConference, June 18–21, 2017, Bled, Slovenia*. Maribor: University of Maribor Press; 2017. 2017:427–443. Available from: <https://doi.org/10.18690/978-961-286-043-1.30>.
7. **Delitsyn L.L.** Internet Adoption Forecasting Using an Innovation Diffusion Model. *Computing, Telecommunications and Control*. 2010;(1);74–82. (In Russ.)
8. **Delitsyn L.L.** Diffusion of Mobile Communications in Russia: Simulation of Sociological Surveys Data. *Computing, Telecommunications and Control*. 2009;(1);97–105. (In Russ.)
9. **Kuznetsov Yu.A., Markova S.E., Michasova O.V.** Economic and Mathematical Modeling of Dynamics of Change of Generations of Telecommunications Services. *Financial Analytics: Science and Experience*. 2014;7(34);43–55. (In Russ.)
10. **Vildanov V.K.** et al. Simulation of the Technology Replacement Process. *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Series: Social Sciences*. 2016;(1);9–15. (In Russ.)
11. **Kumar A.** et al. Diffusion of Mobile Communications: Application of Bass Diffusion Model to BRIC Countries. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 2007;66(4):312–316.
12. **Dubovtcev A., Ermolaev M.** The Forecasting of Mobile Communication Market Development on the Basis of Shaped Models. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2010;(4):39–41. (In Russ.)
13. **Balash V.** et al. Comparative Analysis of Innovation Diffusion Models: Empirical Results and Predictive Performance on Russian Mobile Phone Propagation Data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;(1564):12–27.
- (International Conference on Mathematical Models & Computational Techniques in Science & Engineering 22–24 February 2020, London, UK). Available from: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1564/1/012027>.
14. **Sidorov S.** et al. Extended Innovation Diffusion Models and Their Empirical Performance on Real Propagation Data. *Journal of Marketing Analytics*. 2021;9(1):99–110. Available from: <https://doi.org/10.1057/s41270-021-00106-x>.
15. **Trachuk A.V., Linder N.V.** Diffusion of E-Business Technology in Russia: Results of an Empirical Study. *Russian Management Journal*. 2017;(1):27–50. (In Russ.) Available from: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu18.2017.102>.
16. **Adamuthe A.C., Thampi G.T.** Forecasting Technology Maturity Curve of Cloud Computing with its Enabler Technologies. *Journal of Scientific Research*. 2020;64(2):239–246. Available from: <https://doi.org/10.37398/JSR.2020.640233>.
17. **Schilling M.A., Esmundo M.** Technology S-Curves in Renewable Energy Alternatives: Analysis and Implications for Industry and Government. *Energy Policy*. 2009;37(5):1767–1781. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.01.004>.
18. **Sudtasan T., Mitomo H.** Comparison of Diffusion Models for Forecasting the Growth of Broadband Markets in Thailand. In: *Conf. Paper 14th Asia-Pacific Regional Conference of the International Telecommunications Society (ITS): «Mapping ICT into Transformation for the Next Information Society», 24th–27th June, 2017, Kyoto, Japan*. Kyoto: 2017.
19. **Probst L.** et al. *Digital Transformation Scoreboard 2018. EU Businesses Go Digital: Opportunities, Outcomes and Uptake*. Luxembourg: Publ. Office of the European Union; 2018. Available from: <https://doi.org/10.2826/821639>.
20. **Meadea N., Islam T.** Forecasting in Telecommunications and ICT – A Review. *International Journal of Forecasting*. 2015;31(4):1105–1126. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2014.09.003>.
21. **Akın E.** et al. Parameter Identification for Gompertz and Logistic Dynamic Equations. *PLoS ONE*. 2020;15(4):e0230582. Available from: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230582>.

About the authors

Pavel E. Prokhorov – Scientific Worker, Scientific Lab «Quantitative methods of regional development», Plekhanov Russian University of Economics. 36, Stremyanny Lane, Moscow, 117997, Russia. E-mail: prohorov.pe@rea.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1503-2326>.

Vitaly G. Minashkin – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Vice-Rector for Research, Plekhanov Russian University of Economics. 36, Stremyanny Lane, Moscow, 117997, Russia. E-mail: Minashkin.VG@rea.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6494-8672>.

Funding

The reported study was funded by RFBR, project number 19-310-90067.