

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР КАК ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТРУДА В ЭПОХУ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

А.А. АКАЕВ, доктор технических наук, профессор, иностранный член РАН. E-mail: askarakaev@mail.ru. Институт математических исследований сложных систем Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия. ORCID: 0000-0001-8158-0171.

В.А. САДОВНИЧИЙ, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН. E-mail: info@rector.msu.ru. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Институт математических исследований сложных систем МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

В статье показано, что в цифровую эпоху большинство работ когнитивного характера сохраняется за человеческим фактором, поскольку эти работы, как правило, могут быть фрагментированы на непрограммируемые задачи (50-75%), требующие для их решения творческого человеческого труда, и рутинные программируемые задачи, которые могут быть использованы интеллектуальными машинами (ИМ). Авторами предложена математическая модель расчета производительности труда в цифровой экономике, где повсеместно используется симбиоз «человек+ИМ». Расчеты, выполненные с помощью разработанной модели, показывают: 1) симбиоз «человек+ИМ» позволяет реализовать потенциальные возможности повышения производительности труда в экономике с помощью цифровых технологий; 2) наибольшая производительность труда достигается в симбиозе «человек+ИМ», где доминирует человеческий труд, а наименьшая производительность труда – там, где превалирует доля программируемой работы, исполняемой ИМ; 3) в развитых странах уже к середине 2020-х годов может быть достигнута производительность труда, равная 3% в год, которая имеет шанс сохраниться до 2040-х годов.

Ключевые слова: человеческий капитал, производительность труда, технологический прогресс, факторы производительности, экономический рост, цифровые технологии, интеллектуальные машины, цифровая экономика

DOI: 10.47711/0868-6351-184-45-58

Введение. Исторически первой моделью определения технического (технологического) прогресса (ТП) в устойчивом долгосрочном экономическом росте [1] стала модель Кузнецца-Кремера, которая была сформулирована Саймоном Кузнецом [2] и формализована Майклом Кремером [3]:

$$q_A(t) = \frac{dA}{Adt} = bN(t), \quad b = \text{const}, \quad (1)$$

где $A(t)$ – технический прогресс (ТП); $q_A(t)$ – темпы ТП; $N(t)$ – численность населения страны. Поскольку численность рабочей силы $L(t)$ в первом приближении пропорциональна $N(t)$, данная модель определяет ТП через трудовые ресурсы.

Альтернативная модель, определяющая ТП через основной производственный капитал, была предложена Кеннетом Эрроу [4] в 1962 г. и возрождена Полом Ромером [5] в 1986 г. при разработке эндогенной модели экономического роста. В модели ТП Эрроу зависит от объема знаний и навыков работников, приобретенных в процессе трудовой деятельности и определяется задействованным в производстве объемом основного капитала (K) либо капиталовооруженности ($k=K/L$) каждого рабочего места:

$$\text{a) } A(t) = aK^\theta(t) \quad \text{или} \quad \text{b) } A(t) = \bar{a}k^\theta(t), \quad (2)$$

где θ – параметр, характеризующий эффективность обучения ($0 < \theta < 1$); a и \bar{a} – нормирующие коэффициенты.

Разрабатывая модели эндогенного экономического роста, П. Ромер [6] впервые предложил «НИОКР – модель» для определения ТП по результатам инновационной деятельности системы НИОКР:

$$q_A(t) = \frac{dA}{Adt} = cL_A(t), \quad (3)$$

где $L_A(t)$ – текущая численность ученых, инженеров и технических работников, занятых в сфере НИОКР. В дальнейшем Чарльз Джоунс уточнил модель Ромера (3), введя в правую часть уравнения (3) относительную занятость в системе НИОКР [7]:

$$q_A(t) = cl_A(t), \quad (4)$$

где $l_A(t) = L_A(t) / L$.

В нашей работе [8] было предложено дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d}{dl_A} \left(\frac{dA}{Adt} \right) = cl_A(l_M - l_A), \quad (5)$$

где l_M – максимальная величина доли занятых (l_A) в сфере НИОКР в режиме насыщения. Решение уравнения (5) имеет вид:

$$q_A(t) = q_{A0} + \frac{c}{6} [l_A^2(3l_M - 2l_A) - l_{A0}^2(3l_M - 2l_{A0})], \quad (6)$$

где q_{A0} – базовый темп ТП, обусловленный технологиями широкого применения; l_{A0} – доля занятых в системе НИОКР в начальный момент времени. Было также показано, что $l_A(t)$ в большинстве случаев возрастает по логистическому закону [8].

Перечисленные три вида моделей (1), (2) и (4) лежат в основе всех расчетных схем долгосрочного моделирования и прогнозирования ТП в эндогенных моделях экономического роста [9-12]. Все они прошли верификацию и дают приемлемую для практических расчетов точность. Однако все они оказались непригодными для прогнозирования ТП в информационно-цифровую эпоху. Поскольку информационно-цифровая революция началась в 1960-е годы, то вполне естественно, что уже тогда ожидали от информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), включая компьютерные технологии, ускорения технического прогресса и экономического роста. Однако с 1970-х по начало 1990-х годов экономисты развитых стран, изучавшие рост совокупной производительности факторов (СПФ) в отраслях народного хозяйства, использующих ИКТ, отмечали лишь незначительные признаки его ускорения. В этой связи началась дискуссия о влиянии ИКТ на производительность труда, которая проходила на фоне экспоненциального роста капитальных вложений в ИКТ во всех развитых странах. Дискуссия получила широкую известность вследствие «парадокса производительности», сформулированного лауреатом Нобелевской премии Р. Солоу: «Вы можете увидеть эру компьютеров повсюду вокруг себя, но только не в цифрах роста производительности» [13]. Статья Р. Солоу вызвала огромный интерес и стимулировала многочисленные исследования проблемы оценки влияния ИКТ на технический прогресс и экономический рост.

Наиболее широко используемой методологией стала непосредственная оценка влияния ИКТ на выпуск с помощью классического аппарата производственной функции (ПФ) Кобба-Дугласа. Первой работой, заложившей основы этой методологии, стала статья Эрика Бриньолфссона и Лорина Хитта [14], в которой рассматривалась усложненная ПФ вида:

$$Y = \exp(\beta_0 t) \cdot C^{\beta_1} \cdot K^{\beta_2} \cdot S^{\beta_3} \cdot L^{\beta_4}, \quad (7)$$

где были выделены компьютерный капитал (C) и труд (S) в ИКТ-секторе как самостоятельные факторы.

Выполнив весьма трудоемкие расчеты с помощью ПФ (7), Э. Бриньолфссон и Л. Хитт впервые получили надежные результаты, подтверждающие наличие экономического эффекта использования ИКТ. В более поздних работах Э. Бриньолфссона и его соратников было показано, что экономический эффект использования ИКТ наступает не сразу, а с определенным запаздыванием, связанным с достижением критического порога развития инфраструктуры ИКТ. Эконометрический анализ панельных данных по американской экономике, выполненный Дейлом Йоргенсоном совместно с Ковином Стиро [15], убедительно показал основной вклад ИКТ в рост производительности до 2% в 1995-2000 гг. Вклад ИКТ в рост ВВП развитых стран в середине 2000-х годов оценили также Д. Йоргенсон и К. Мотохаши: он составил около 20-40%, причем ИКТ определяют до 70-80% в повышении СПФ [16].

Поскольку ТП зависит от уровня знаний, то в информационно-цифровую эпоху он должен определяться динамикой производства технологической информации в экономике. В работе [17] нами впервые была установлена аналитическая зависимость темпов ТП от производства эндогенной технологической информации в экономике, справедливая для долгосрочного периода:

$$q_A(t) = \sqrt{\frac{I_D}{K_D} \cdot \dot{g}(t)}, \quad (8)$$

где $I_D(t)$ – инвестиции в основной капитал $K_D(t)$ информационно-цифровых отраслей экономики; $\dot{g}(t)$ – темпы производства технологической информации в экономике. Было также получено функциональное выражение для $\dot{g}(t)$ в эпоху информационной экономики:

$$a) \dot{g}(t) = v(t) = \frac{1}{s_g} [1 + c_1 \cdot e^{-s_g \cdot g(t)}]^{-1}; \quad c_1 = e^{s_g \cdot g_0} \left(\frac{1}{v_0} - 1 \right); \quad (9)$$

$$b) s_t \cdot t = s_g \cdot g(t) - c_1 \cdot e^{-s_g \cdot g(t)} + c_2; \quad c_2 = \frac{1}{v_0} - 1 - s_g \cdot g_0,$$

где s_t и s_g – масштабирующие коэффициенты; c_1 и c_2 – постоянные интегрирования, зависящие от начальных условий – g_0 и v_0 . Как видно из рассмотрения (9) ТП описывается, как и следовало ожидать, логистической функцией (9а) с переменной скоростью (9б). Верификация моделей (8) и (9), проведенная в работе [17], показала, что вклад ИКТ в ТП развитых экономик в информационную эпоху (1980-2020 гг.) описывается формулами (8) и (9) с весьма высокой точностью. В настоящей работе описана прогнозная траектория движения ТП в эпоху цифровой экономики (2020-2040 гг.) и показано его влияние на производительность труда в экономике.

В последнее десятилетие появилось множество работ, в которых рассмотрены вопросы формирования цифровой экономики, а также воздействия информационных и цифровых технологий на традиционные отрасли народного хозяйства [18]. Особое внимание в большинстве работ уделено эволюции рынка труда, вызванной повсеместным применением ИКТ в последние 30 лет [19]. Она выразилась в возросшем технологическом замещении рабочих мест, вызвав тенденцию роста безработицы в развитых странах. Вместе с тем отмечается технологическое смещение спроса на труд высокой квалификации, что усиливает поляризацию труда в высоко- и низкоквалифицированном сегментах, сокращая рабочие места средней квалификации и увеличивая неравенство доходов в обществе [20]. В [21] рассмотрены глобальные сценарии, которые позволяют исследовать долгосрочные технологические траектории и трансформацию модели труда. Важно, что отмечается целесообразность рассмотрения проблемы занятости на долгосрочных траекториях. В

большинстве работ утверждается, что с переходом к цифровой экономике указанные процессы только усилятся [18-20]. Действительно, цифровые технологии обладают наиболее интенсивным трудосберегающим свойством [18-20]. Поэтому в предстоящие десятилетия человечеству придется впервые соприкоснуться с широкомасштабным сокращением рабочих мест, поляризацией труда и резким снижением доходов большинства домохозяйств. Ученые из Массачусетского технологического института Эрик Бриниолфссон и Эндрю МакАфи утверждают: «Экономика в XXI веке качественно изменится. Начнется массовое замещение квалифицированного труда капиталом и, как следствие, – резкое снижение трудовой активности и трудовых доходов» [20].

Ускорение технологического замещения труда с ростом цифровой экономики. Проблемы, связанные с возможным технологическим замещением рабочих мест и ростом структурной безработицы, обсуждаются с начала 1-й промышленной революции [19]. Действительно, при смене прежних технологических укладов, в переходные периоды возникали проблемы краткосрочных структурных безработиц, но они никогда не превращались в системную или хроническую. Новый технологический уклад создавал массу новых рабочих мест, зачастую лучше оплачиваемых, но требующих более высокой квалификации работников. Поэтому значительная часть безработных после дополнительного обучения и повышения квалификации могла получить хорошую работу в новом сегменте рынка труда. Распространение новых технологий в прошлом было довольно медленным процессом, занимавшим два-три десятилетия и более, что позволяло рабочим освоить новые профессии и адаптироваться к новым условиям труда. Большинство экономистов и сегодня убеждены в том, что структурная безработица всегда имеет временный характер и не представляет собой серьезной проблемы. Однако один из величайших экономистов XX в. Джон Мейнард Кейнс придерживался совершенно иной точки зрения на эту проблему и прогнозировал следующее [22, р. 358]: «Нас одолевает болезнь, о которой отдельные читатели, возможно, еще и не слышали, но которую в ближайшие годы будут много обсуждать – технологическая безработица. Она возникает потому, что скорость с какой мы открываем трудосберегающие технологии, превосходит нашу способность находить новое применение высвобожденному труду». Сегодня это время пришло.

Цифровые технологии, порожденные 4-й промышленной революцией, являются экспоненциальными [18-20] и будут проникать в жизнь общества гораздо быстрее, чем технологии предыдущих революций, поскольку впервые будут распространяться по готовым цифровым сетям – инфраструктуре, созданной в период 3-й информационной революции (1950-2010 гг.) [18, с. 34]. Поэтому большинству будет трудно адаптироваться к изменениям на рынке труда, обусловленным стремительным развитием цифровых технологий. Это означает, что в эпоху цифровой экономики вероятность непрерывного роста технологической безработицы резко возрастает. Этот фундаментальный сдвиг, происходящий в сфере труда, Мартин Форд образно сформулировал следующим образом: «Раньше машины служили средством увеличения производительности труда работников. А теперь машины сами превращаются в работников, вытесняя людей из экономики» [19, с. 11]. Появление интеллектуальных компьютеров и роботов с элементами искусственного интеллекта (*далее* – интеллектуальные машины – ИМ) и их неудержимая экспансия во все сферы общественной жизни и экономики создали условия для массовой замены занятых не только физической рутинной работой, но и когнитивной работой рутинного характера. Новые цифровые технологии способны кардинально сократить рабочие места для людей средней квалификации, уничтожая целые профессии. Предполагается, что уже в бли-

жайшие пять-десять лет значительно сократится численность переводчиков, журналистов, финансовых аналитиков, сценаристов, репетиторов, банковских служащих, бухгалтеров, брокеров, водителей транспортных средств и многих других профессий [18, с. 95].

Однако при этом ожидается, что цифровые технологии создадут множество новых рабочих мест в таких новых профессиях, как аналитика больших данных, обучение и управление искусственным интеллектом (ИИ), разработка интеллектуальных вычислительных технологий и программного обеспечения, обучение и управление интеллектуальными роботами. Рабочие места в этих новых отраслях требуют глубоких и разносторонних технических и математических знаний и навыков работы. Следовательно, цифровая экономика повысит спрос на высококвалифицированных специалистов в STEM-областях (научные исследования, инновационные технологии и инжиниринг, математика, обслуживающая цифровые технологии). Кроме того, конечно же, потребуются высококвалифицированные инженеры по робототехнике, специалисты по ИИ и машинному обучению, архитекторы виртуальной и дополненной реальности. В большинстве работ этим аспектам исследований уделяется мало внимания. Редким исключением является работа [23], в которой, наряду с грядущим сокращением рабочих мест для людей средней квалификации, прогнозируется создание новых высококвалифицированных рабочих мест. В ней оценивается, что к 2030-2035 гг. будет вытеснено в процессе автоматизации примерно 12% рабочих мест, а создано около 13% совершенно новых рабочих вакансий [23, с. 59]. Думается, что это – сбалансированный подход к анализу воздействия ИМ на рынок труда. В указанной книге также отмечается, что 75% существующих рабочих мест будут изменены или дополнены программой и роботами, т.е. сохраняют актуальность для людей.

Широкомасштабная цифровизация, компьютеризация и роботизация всех сфер хозяйственной и общественной жизни в ближайшие десятилетия, безусловно, ускорят процесс дальнейшей автоматизации производства и технологического замещения труда капиталом. По сути, начинается новый этап автоматизации машин, способных обучаться и совершенствоваться в процессе производственной деятельности. Если до сих пор автоматизация вытесняла человека из сферы рутинного физического труда, то теперь прогресс в области машинного обучения и ИИ позволит начать масштабное вытеснение человека уже из сферы умственного труда, заменяя представителей рутинного интеллектуального труда, т.е. в большинстве своем представителей среднего класса – основной опоры демократии и стабильности в современных обществах. Но, как отмечено выше, для них откроется достаточно новых рабочих мест, требующих высокой квалификации и новых цифровых компетенций. Поэтому проблема заключается в том, чтобы система высшего профессионального образования была своевременно переориентирована на формирование у выпускников новых знаний и компетенций.

Технологическое смещение спроса на труд высокой квалификации – вступление цифровой эпохи. В развитых странах наблюдается другая закономерность будущей цифровой эпохи, которая заключается в том, что снижается спрос на менее квалифицированный труд [20, с. 181], причем, более всего на рабочие места, связанные с рутинным когнитивным трудом, которые обычно занимали представители среднего класса со средним уровнем квалификации. Большинство неквалифицированных рабочих мест в сфере услуг сохранится, поскольку их экономически невыгодно замещать дорогими интеллектуальными роботами. Падение спроса на работников средней и средневысокой квалификации означает, что продолжится тенденция дальнейшего снижения их заработной платы, начавшаяся в 1980-е годы. Работники со средним общим или профессиональным образованием в дальнейшем могут рассчитывать только на низкооплачиваемые рабочие места в сфере обслуживания и

услуг. В результате труд поляризуется: рабочие места, требующие средней квалификации со средним уровнем зарплаты будут интенсивно сокращаться; а занятость будет все больше концентрироваться в наиболее высококвалифицированном и высокооплачиваемом, а также в наименее квалифицированном и низкооплачиваемом сегментах труда [20, с. 186]. По мнению большинства экспертов, процесс поляризации рабочих мест, вызванный информационными технологиями, получит ускорение с началом широкого внедрения цифровых технологий. Таким образом, цифровые технологии будут усиливать как безработицу, так и неравенство доходов.

С широким проникновением цифровых технологий во все сферы экономики и управления к работникам все чаще предъявляются дополнительные требования: наряду с высокой профессиональной компетенцией также хорошее знание цифровых технологий. Все больше требуются работники, обладающие математическим и инженерным мышлением, соответствующим эффективной работе с ИМ. Поэтому в цифровую эпоху полноценное высшее образование в первую очередь должно развивать те преимущества, которыми человек обладает перед ИМ: творческое воображение; выявление закономерностей в сложных явлениях; способность сотрудничества в решении сложнейших проблем; постоянная адаптация и усвоение новых знаний и навыков работы. Более того, в современных условиях рынка труда, повышение квалификации должно стать непрерывным процессом. Только так человек сможет играть ключевую роль в симбиозе «человек+ИМ», которая станет главной движущей силой цифровой эпохи.

Яркими примерами такого симбиоза «человек+ИМ» могут служить, например, симбиоз достаточно сильного шахматиста и скромного шахматного компьютера, который способен обыграть любого шахматиста, включая чемпиона мира, а также самую мощную суперкомпьютерную машину, или же симбиоз высокопрофессионального врача и компьютерного «доктора Ватсона», который оказывается намного более надежным и эффективным, чем каждый из них в отдельности [20, с. 246].

Ученым и разработчикам необходимо добиваться, чтобы ИМ облегчали человеческий труд, усиливали его когнитивные способности. Это чрезвычайно важно, поскольку именно симбиоз человека с ИМ позволит в полной мере реализовать потенциал повышения производительности труда ИМ при выполнении работ преимущественно когнитивного характера. Далее это показано на математических моделях.

Главная движущая сила цифровой экономики – симбиоз «человек+ИМ». Есть достаточно оснований говорить о том, что большинство работ в будущем невозможно выполнить без людей. Действительно, любая работа когнитивного характера может быть фрагментирована на определенный набор задач, одни из которых являются программируемыми, следовательно, могут быть автоматизированы и переданы для исполнения ИМ или программам-ботам, другие в принципе невозможно автоматизировать, и они должны решаться людьми. Результаты специальных исследований [23] говорят о том, что во многих случаях на машину придется решение примерно 20% рутинных задач. В целом разброс охватывает от 25 до 50%. Таким образом, делается вывод о том, что грядущая автоматизация с использованием цифровых технологий заменит максимум 25-50% рутинной и скучной работы человека [23, с. 66-68], что позволит ему удвоить усилия для выполнения остальной части работы и существенно повысить производительность труда или качество исполнения. В работе [24] справедливо отмечается, что цифровые бизнесы обладают способностью поддерживать и ускорять имеющийся экономический рост, но никак не создают самостоятельного нового механизма генерации такого роста. На наш взгляд, такая генерация как раз и создается путем эффективного использования в цифровой экономике симбиоза «человек+ИМ». Именно вышеуказанные соображения составляют основу нашей математической модели расчета воздействия высококвалифицированного человеческого капитала на производительность труда в цифровой экономике.

Вышесказанное очень напоминает начавшиеся в 1980-е годы процессы дробления промышленного производства на фрагменты и перевода отдельных из них, как правило наиболее трудоемких, в развивающиеся страны с относительно дешевой рабочей силой. Конечно, прогрессивным шагом со стороны развитых стран было сопровождение этого процесса передачей инновационных технологий и ноу-хау, хотя и с целью обеспечения высоких стандартов качества, принятых в развитых странах. Сочетание высоких технологий и низкой заработной платы радикально снижало цену изготовления продукции и резко повышало объемы прибыли. Но рабочие места с высокой зарплатой, требующие высокой квалификации работника оставались в самих развитых странах. Здесь сочетались источники конкурентоспособности развитых стран – их технологические, управленческие и маркетинговые ноу-хау и сравнительное преимущество развивающихся стран – их дешевая рабочая сила. В итоге выигрывали все. Причем, практика перевода трудоемкой рутинной части производства из развитых стран в развивающиеся убедительно показала, что эта часть производства могла быть полностью автоматизирована. В эпоху цифровых интеллектуальных машин уже работа будет фрагментирована на задачи и рутинные из них будут передаваться ИМ, а интересная творческая часть работы останется людям. Кроме того, общее руководство выполнением любой работы также, безусловно, останется за людьми. Здесь потребуются высококвалифицированные менеджеры.

Математические модели для описания и прогнозирования технологического прогресса в цифровой экономике. В работе [17] нами определена функция $A_d(t)$, описывающая динамику передового уровня цифровых технологий в мире, т.е. передовую технологическую границу прогресса на период до 2040 г., который совпадает с повышательной стадией 6-й длинной волны (ДЛВ) Кондратьева мирового экономического развития. Причем, конкретные расчеты были проведены для темпов роста технологического прогресса $q_{A_d}(t)$ на примере экономики США:

$$q_{A_d}(t) = \sqrt{E_d(t) \cdot \dot{g}(t)}, \quad (10)$$

где $E_d(t)$ – относительные инвестиции (I) в основной капитал (K), $E_d(t) = I_d(t)/K_d(t)$; $\dot{g}(t)$ – темпы производства технологической информации. Здесь $E_d(t)$, например для экономики США, хорошо аппроксимируется линейной функцией:

$$E_d(t) = E_0 + E_1(t - T_{bd}), \quad (11)$$

где $T_{bd}=2018$ г. – начало 6-й цифровой ДЛВ; $E_0=0,09$; $E_1=0,002$.

Функция $\dot{g}(t)$ в (10) описывается логистической функцией с переменной скоростью и стабилизацией к концу периода, путем возврата к стационарному уровню сверху [17]:

$$\begin{aligned} \text{a) } \dot{g}(t) &= \frac{1}{s_g} \left[1 - \frac{e^{-\rho \cdot s_g \cdot g(t)}}{1 - \rho} + c_1 \cdot e^{-s_g \cdot g(t)} \right]^{-1}; \\ \text{b) } s_t \cdot t &= s_g \cdot g(t) + \frac{e^{-\rho \cdot s_g \cdot g(t)}}{\rho(1 - \rho)} - c_1 \cdot e^{-s_g \cdot g(t)} + c_2; \\ \text{c) } c_1 &= e^{s_g \cdot g_{bd}} \left(\frac{1}{s_g \cdot v_{bd}} - 1 + \frac{e^{-\rho \cdot s_g \cdot g_{bd}}}{1 - \rho} \right); \\ \text{d) } c_2 &= \frac{1}{s_g \cdot v_{bd}} - 1 - s_g \cdot g_{bd} - \frac{e^{-\rho \cdot s_g \cdot g_{bd}}}{\rho}, \end{aligned} \quad (12)$$

где s_t и s_g – масштабирующие коэффициенты, $s_t \cdot t = \bar{t}$ и $s_g \cdot g(t) = \overline{g(t)}$; ρ – коэффициент торможения, наиболее подходящее его значение равно $\rho=0,2$; g_{bd} и $v_{bd} = \dot{g}_{bd}$ – начальные значения соответствующих функций $g(t)$ и $v(t)=g(t)$ в год $T_{bd}=2018$ г. Уточненные расчеты и оценки дали следующие величины для постоянных коэффициентов и параметров в уравнениях (12):

$$s_t = 0,6; \quad s_g = 412,3; \quad \bar{v}_{bd} = s_g \cdot v_{bd} = 0,1; \quad (13)$$

$$\bar{g}_{bd} = s_g \cdot g_{bd} = 6,56; \quad c_1 = 6559,3; \quad c_2 = 1,1.$$

При этом стабилизация функции $v(t)=g(t)$ (12а) начинается с момента времени $T_{rt}=2042$ г., что означает завершение процесса диффузии цифровых технологий в экономике.

Для расчета темпов технологического прогресса формулу (10) прежде всего необходимо преобразовать с использованием (12а) и (12б) в следующий вид:

$$q_{A_d}(t) = \sqrt{\frac{E_d(t)}{s_g [1 + \bar{g}(t) - s_t \cdot t + 1/\rho \cdot e^{-\rho \cdot \bar{g}(t)} + c_2]}}. \quad (14)$$

Численные данные всех постоянных параметров приведены в (11) и (13). При этом функция $\bar{g}(t)$ находится численным методом в диапазоне $T_{bd} \leq t \leq T_{rt}$, путем решения нелинейного уравнения (12б). Имея численные значения $q_{A_d}(t)$ в интересующем временном диапазоне, далее нетрудно рассчитать траекторию движения самого технологического прогресса $A_d(t)$:

$$A_d(t) = A_{bd} \cdot \exp\left[\int_{T_{bd}}^t q_{A_d}(\tau) d\tau\right]. \quad (15)$$

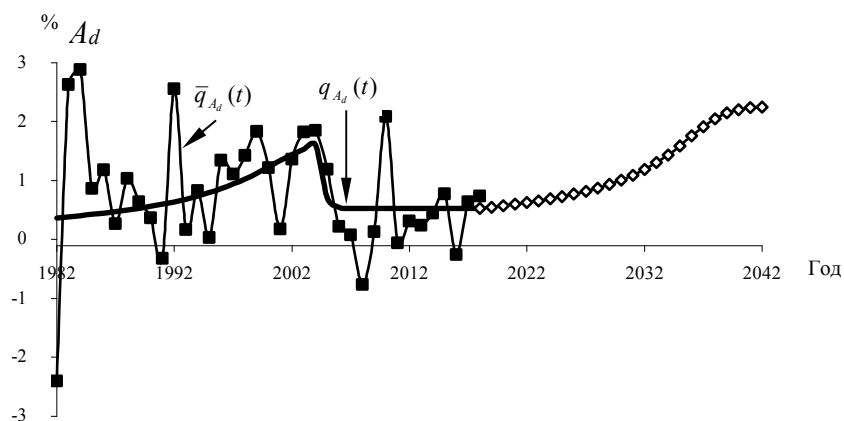


Рис. 1. Темпы технологического прогресса в информационно-цифровую эпоху:
 —◇— прогноз

График темпов технологического прогресса $q_{A_d}(t)$ в период с 2018 по 2042 г. на повзврательной стадии 6-й цифровой ДЛВ Кондратьева, рассчитанный по формуле (14), приведен на рис. 1. На этом же рисунке представлены графики темпов технологического прогресса $q_{A_d}(t)$ для 5-й информационной ДЛВ Кондратьева (1982-2018 гг.), рассчитанные по формулам, полученным в работе [17], наряду с фактической кривой темпов технологического прогресса $\bar{q}_{A_d}(t)$, полученной путем агрегирования средним

геометрическим рядом по исходным данным, взятым из двух наиболее надежных источников [*Bureau of Labor Statistics; University of Groningen*]. Верификация проведенная путем сравнения соответствующих траекторий технологического прогресса (A_d и \bar{A}_d), рассчитанных по формуле (6), показала, что среднеквадратическая ошибка аппроксимации составляет 1,95%. Графики масштабированных траекторий технологического прогресса ($a_d = A_d/A_{bd}$ и \bar{a}_d) приведены на рис. 2, где непосредственно видно хорошее совпадение модельной (расчетной) и фактической траекторий движения технологического прогресса на большем участке 5-й ДЛВ Кондратьева.

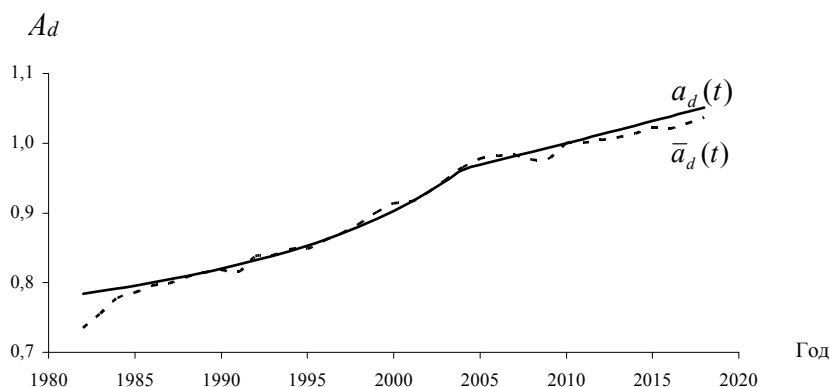


Рис. 2. Технологический прогресс

Математические модели для описания и расчета динамики роста производительности труда в симбиозе «человек+ИМ». Как видно (см. рис. 1), технологический прогресс, обусловленный цифровыми технологиями, будет нарастать весьма медленно в 2020-е годы, достигнув 1% к концу десятилетия, и только в 2030-е годы существенно ускорится, и его темпы к началу 2040-х годов удвоятся и превысят 2% в год. Однако уже в 2020-е годы возможно существенное повышение производительности труда в экономике путем повсеместного и эффективного использования симбиоза «человек+ИМ». Покажем это с помощью математической модели. Производительность труда в симбиозе «человек+ИМ» $A_h(t)$ в эпоху цифровой экономики может быть описана уравнением [9, с. 136]:

$$\dot{A}_h(t) = q_h(t) A_d^\gamma(t) \cdot A_h^{1-\gamma}(t), \quad (16)$$

где $A_d(t)$ – цифровой технологический прогресс (максимальный уровень цифровых технологий в мире); $q_d(t)$ – функция, определяющая переходный процесс в налаживании эффективной совместной работы человека с ИМ. Обычно этот процесс занимает один среднесрочный деловой цикл продолжительностью 6-10 лет. Приближенно его можно описать логистической функцией:

$$q_h(t) = \frac{q_{hm}}{1 + \eta \cdot \exp[-\vartheta(t - T_{bd})]}. \quad (17)$$

Если принять продолжительность делового цикла равным 8 годам, тогда для параметров η и ϑ легко получаем следующие оценки: $\eta=9$; $\vartheta=0,55$. Величину q_{hm} оценим позже.

Рассмотрим дифференциальное уравнение (16) подробнее. Параметр γ в этом уравнении характеризует ту долю работы, которая автоматизируется для ИМ, тогда

как оставшаяся часть работы $(1-\gamma)$ сохраняется за человеком. При $\gamma=0$, из уравнения (16) получаем простейшее уравнение:

$$\dot{A}_h(t) = q_h(t) A_h(t), \quad (18)$$

которое описывает рост производительности труда работника без использования цифровых технологий и ИМ. Данное уравнение тождественно уравнению, описывающему накопление человеческого капитала $h(t)$ в годы работы, после окончания образования [10, с. 555]:

$$\dot{h}(t) = q_h(t) \cdot h(t). \quad (19)$$

По окончании обучения человек обладает относительным запасом знания, который описывается формулой [9, с.61]:

$$h = \exp(\psi \cdot u), \quad (20)$$

где u – среднее число лет обучения; ψ – коэффициент отдачи на образование. Эмпирические оценки этого коэффициента показали, что $0,06 \leq \psi \leq 0,1$ [9, с.64]. Это означает, что дополнительный год образования увеличивает человеческий капитал на 6-10%. В дальнейших расчетах мы используем нижнюю границу: $\psi \approx 0,06$. Поскольку в уравнении (20) в годы обучения $u \sim t$, то $\dot{h} = \psi \exp(\psi \cdot u) = \psi h$. Отсюда непосредственно следует, что $q_{hm} = \dot{h}/h = \psi$. Итак, максимальное значение $q_h(t)$ в формуле (17), на котором эта функция стабилизируется, равно:

$$q_{hm} = \psi = 0,06. \quad (21)$$

В случае, когда $\gamma=1$, уравнение (16) примет вид:

$$\dot{A}_h(t) = q_h(t) A_d(t). \quad (22)$$

Здесь скорость роста производительности труда работника зависит исключительно от цифрового технологического прогресса, поскольку человек не участвует в выполнении работы, а лишь наблюдает или, в лучшем случае, контролирует работу ИМ. При любых других значениях, уравнение (16) показывает, что производительность труда в экономике растет пропорционально средней взвешенной величине производительности работника и уровня цифрового технологического прогресса. В дальнейшем, рассмотрим три значения γ :

$$\gamma_1 = \frac{1}{3}; \quad \gamma_2 = \frac{1}{2}; \quad \gamma_3 = \frac{2}{3}. \quad (23)$$

В первом случае превалируют фрагменты работы, выполняемые человеком, в третьем – машиной, а во втором они распределены поровну. Важно знать, в каком из этих вариантов наблюдается максимальная производительность труда. Решение уравнения (16) имеет вид:

$$A_h(t) = [A_{h0}^\gamma + \gamma \int_{T_{bd}}^T q_h(t) A_d^\gamma(t) dt]^\frac{1}{\gamma}. \quad (24)$$

Поскольку производительность труда работника в начальный момент A_{h0} определяется человеческим капиталом, накопленным в процессе обучения (20) и в дальнейшей практической деятельности, полагая, что с цифровыми технологиями работает человек высокой квалификации, окончивший магистерскую программу (обучавшийся 18 лет и более, т.е. $u=18$). Предположим, что для всестороннего освоения знаний и навыков работы с ИМ работнику понадобились 3 года с наивысшей отдачей ($\psi=0,1$). Тогда $u=21$ и при $\psi=0,1$ по формуле (20) получаем

$$A_{h0} = 8,17. \quad (25)$$

Итак, формула (24) позволяет просчитать динамику роста производительности труда в цифровой экономике при любых значениях параметра γ .

На практике, для сравнительного анализа, больше подходят не сами траектории роста производительности труда (24), а темпы их роста $q_{A_h}(t)$, которые проще всего можно получить из уравнения (16):

$$q_{A_h}(t) = \frac{\dot{A}_h(t)}{A_h(t)} = q_h(t) \left(\frac{A_d(t)}{A_h(t)} \right)^\gamma. \tag{26}$$

Подставив в данную формулу выражения для $A_d(t)$ (15), $A_h(t)$ (24) и $q_h(t)$ (17), получим:

$$q_{A_h}(t) = \frac{q_h(t) \cdot A_d^\gamma(t)}{A_{h0}^\gamma + \gamma \int_{T_{bd}}^T q_h(t) A_d^\gamma(t) dt}, \text{ где}$$

$$q_h(t) = \frac{q_{hm}}{1 + \eta \cdot \exp[-\vartheta(t - T_{bd})]}. \tag{27}$$

Здесь $A_{h0}=8,17$ (25); $\eta=9$; $\vartheta=0,55$ (17); $q_{hm}=0,06$ (21).

Темпы роста производительности труда в цифровой экономике при повсеместном и эффективном использовании симбиоза «человек+ИМ», рассчитанные по формуле (27), графически представлены на рис. 3 при трех значениях параметра γ : $\gamma_1 = \frac{1}{3}$; $\gamma_2 = \frac{1}{2}$; $\gamma_3 = \frac{2}{3}$. Соответствующие кривые роста производительности труда в цифровой экономике обозначены символами q_1 , q_2 , и q_3 (рис. 3).

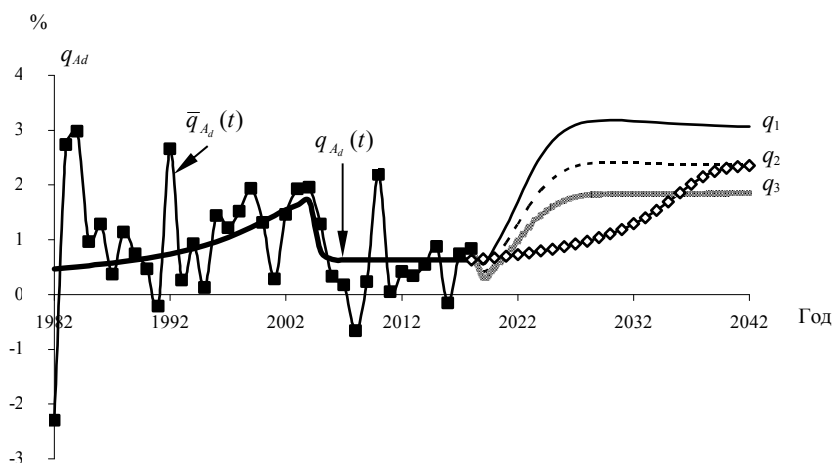


Рис. 3. Темпы технологического прогресса в информационно-цифровую эпоху и производительность труда в цифровой экономике:
 —◇— прогноз

Как видно на рис. 3, наибольшая производительность труда достигается при $\gamma = \frac{1}{3}$, когда доминирует труд человека, а наименьшая производительность труда наблюдается при $\gamma = \frac{2}{3}$, когда превалирует доля работы, исполняемая машинами.

В любом случае именно симбиоз «человек+ИМ» позволяет эффективно использовать потенциал цифровых технологий уже на начальном этапе формирования цифровой экономики, обеспечивая рост производительности труда до потенциальных значений в

середине 2020-х годов (см. рис. 3), тогда как сами цифровые технологии максимально проявляются только с середины 2030-х годов, т.е. на десятилетие позже.

Заключение. 1. Большинство работ когнитивного характера в цифровую эпоху сохранится за людьми, поскольку все они, как правило, фрагментируются на непрограммируемые задачи, требующие для их решения творческого высококвалифицированного человеческого труда, и рутинные программируемые задачи, которые могут быть автоматизированы и переданы для исполнения ИМ. В этой связи, резко возрастают цифровые компетенции и умение человека работать в симбиозе с ИМ. Все это говорит о несостоятельности многочисленных прогнозов и гипотез о том, что в цифровую эпоху большинство рабочих мест будет отнято у людей ИМ.

2. Основной движущей силой цифровой экономики станет симбиоз «человек+ИМ», который повсеместно и эффективно работает под руководством человека. На основе математической модели показано, что, именно высокий уровень человеческого капитала и его эффективное взаимодействие с ИМ, с самого начала формирования цифровой экономики позволяет реализовать потенциал цифровых технологий по повышению производительности труда. Причем наибольшая производительность труда достигается в симбиозе «человек+ИМ», где доминирует высококвалифицированный человеческий труд, а наименьшая наблюдается там, где превалирует программируемая доля работы, исполняемая ИМ. Также рассчитано, что для развитых экономик, являющихся лидерами в формировании цифровой экономики, уже к середине 2020-х годов могут быть достигнуты темпы роста производительности труда, равные 3% в год, которые имеют большие шансы сохраниться вплоть до 2040-х годов.

Поскольку основной движущей силой цифровой экономики является симбиоз «человек+ИМ», ученым и разработчикам необходимо добиваться, чтобы ИМ были исключительно дружелюбны к людям и служили усовершенствованию и дополнению человеческого труда, усилению его когнитивной способности. Вместе с тем система образования в цифровую эпоху должна, наряду с формированием у людей глубоких профессиональных знаний и прочных навыков работы, обеспечивать их хорошими математическими знаниями, инженерным мышлением, умением работать в команде и достаточными компетенциями в области цифровых технологий, чтобы будущие специалисты могли успешно и эффективно работать совместно с ИМ.

Литература / References

1. Solow R.A. *Contribution to the Theory of Economic Growth* // *Quarterly Journal of Economics*. 1956. Vol. 70. February, pp. 65-94.
2. Kuznets S. *Population Change and Aggregate Output / Demographic and Economic Change in Developed Countries*. Princeton, New York: Princeton University Press, 1960. Pp. 324-340.
3. Kremer M. *Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990* // *Quarterly Journal of Economics*. 1993. Vol. 108. August. Pp. 681-716.
4. Arrow K.J. *The Economic Implications of Learning-by-doing* // *Review of Economic Studies*. 1962. Vol. 29. June. Pp. 155-173.
5. Romer P.M. *Increasing Returns and Long-Run Growth* // *Journal of Political Economy*. 1986. Vol. 94. October. Pp. 1002-1037.
6. Romer P.M. *Endogenous Technical Change* // *Journal of Political Economy*. 1990. Vol. 98. № 5. Pp. 71-102.
7. Jones Ch.I. *R&D-Based Models of Economic Growth* // *Journal of Political Economy*. 1995. Vol. 103. Issue 4. Pp. 759-784.
8. Акаев А.А., Садовничий В.А., Ануфриев И.Е. Усовершенствованная НИОКР-модель для прогнозных расчетов совокупной производительности факторов экономического роста // *Мировая динамика*. М.: КРАСАНД, 2014. С. 15-50. [Акаев А.А., Садовничий В.А., Ануфриев И.Е. Improved R&D model for predictive calculations of the aggregate productivity of economic growth factors // *World dynamics*. М.: КРАСАНД, 2014. Pp. 15-50.]
9. Джонс Ч.И., Воллрат Д. *Введение в теорию экономического роста*. М.: Изд. Дом «Дело» РАНХиГС. 2018. [Jones C., Vollrath D. *Introduction to Economic Growth*. New York: W.W. Norton&Company, 2013.]

10. Асемоглу Дарон. Введение в теорию современного экономического роста. Кн. 1. М.: Изд. Дом «Дело» РАНХиГС, 2018. [Acemoglu D. Introduction to Modern Economic Growth. Princeton, New York: Princeton University Press, 2009.]
11. Барро Р.Дж., Х. Сала-и-Мартин. Экономический рост. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. [Barro R., Sala-i-Martin X. Economic Growth. Cambridge: The MIT Press, 2003.]
12. Курзенев В., Матвеев В. Экономический рост. СПб.: Иумер, 2018. [Kurzenev V., Matvienko V. Economic growth. St-Pb, 2018.]
13. Solow R. We'd Better Watch Out // *New York Times Books Review*, 1987. 12 July.
14. Brynjolfsson E. and L. Hitt. Paradox Lost? Firm-Level Evidence of the Returns to Information Systems Spending // *Management Science*. 1996. Vol. 42. Apr. Pp. 541-558.
15. Jorgenson D., Stiroh K. Raising the Speed Limit: US Economic Growth in the Information Age // *Brookings Papers on Economic Activity*. 2000. Vol. 1
16. Jorgenson D., Motohashi K. Information Technology and the Japanese Economy // *Journal of the Japanese and International Economics*. 2005. Vol. 19. № 4. Pp. 460-481.
17. Акаев А.А., Садовничий В.А. Математические модели для расчета динамики развития в эпоху цифровой экономики // ДАН. 2018. Т. 482. № 3. С. 261-267. [Akaev A.A., Sadovnichii V.A. Mathematical models for calculating the dynamics of development in the era of the digital economy // DAN. 2018. Vol. 482. № 3. Pp. 261-267.]
18. Шваб Клаус. Четвертая промышленная революция. М.: «Э», 2017. [Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Geneva: WEF, 2016.]
19. Форд Мартин. Роботы наступают: Развитие технологий и будущее без работы. М.: Альпинос нон-фикшн, 2016. [Ford M. Rise of the Robots: Technology and the Threat of a Jobless Future. New York: Basic Books, 2015.]
20. Бриньольфссон Э. и МакАфи Э. Вторая эра машин: Работа, прогресс и процветание в эпоху новейших технологий. М.: АСТ, 2017. [Brynjolfsson E., McAfee A. The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. New York: W.W. Norton&Company, 2014.]
21. Гапоненко Н.В., Гленн Джером Клейтон. Технологии индустрии 4.0: проблемы труда занятости и безработицы (научный обзор) // Проблемы прогнозирования. 2020. № 3. С. 40-47. [Gaponenko N.V., Glenn J.C. Technology Industry 4.0: Problems of Labor, Employment and Unemployment // Forecasting problems. 2020. № 3. Pp. 40-47.]
22. John Maynard Keynes. *Essays in Persuasion*. New York: W.W. Norton&Company, 1963.
23. Фрэнк М., Рериг П., Принг Б. Что делать, когда машины начнут делать все: Как роботы и искусственный интеллект изменят жизнь и работу. М.: Эксмо, 2019. [Frank M., Roehrig P., Pring B. What to do when machines do everything. Hoboken, New Jersey: John Wiley&Sons Inc., 2017.]
24. Ганичев Н.А., Кошовец О.Б. Технологический прорыв на базе развития цифровой экономики: возможности, проблемы, риски // Проблемы прогнозирования. 2019. № 6. С. 48-58. [Ganichev N.A., Koshovets O.B. Technological breakthrough based on the development of the digital economy // Forecasting problems. 2019. № 6. Pp. 48-58.]



Статья поступила 25.08.2020. Статья принята к публикации 10.09.2020

Для цитирования: Акаев А.А., Садовничий В.А. Человеческий фактор как определяющий производительность труда в эпоху цифровой экономики // Проблемы прогнозирования. 2021. № 1. С. 45-58. DOI: 10.47711/0868-6351-184-45-58

Summary

THE HUMAN COMPONENT AS A DETERMINING FACTOR OF LABOR PRODUCTIVITY IN THE DIGITAL ECONOMY

A.A. AKAEV, Doctor of Technical Sciences, Professor, Foreign Member of the Russian Academy of Sciences. Lomonosov Moscow State University Institute of Complex Systems Mathematical Research, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0001-8158-0171.

V.A. SADOVNICHY, Doctor of Physics and Mathematics, professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

Abstract: The article provides evidence that most of the cognitive work in the digital age will continue to be reserved for human labor, since this kind of work can generally be fragmented into nonprogrammable tasks (50-75%), the solution of which requires human creative work, and routine programmable tasks that

can be solved by intelligent machines (IMs). The authors propose a mathematical model for calculating labor productivity in the digital economy, characterized by widespread “human+IM” symbiosis. The calculations performed on the proposed model demonstrate that: 1) the human+IM symbiosis uses digital technologies to realize potential opportunities of increasing labor productivity in the economy; 2) the highest level of labor productivity is achieved if human labor prevails in the human+IM symbiosis, while the lowest level of labor productivity is observed if the share of programmable IM-performed work prevails; 3) in developed countries labor productivity of 3% per year can be achieved by the mid-2020s, and this level can be retained until the 2040s.

Keywords: human capital, labor productivity, technological change, factors affecting productivity, economic growth, digital technologies, intelligent machines, digital economy

Received 25.08.2020. Accepted 10.09.2020

For citation: A.A. Akaev, V.A. Sadovnichii. The Human Component as a Determining Factor of Labor Productivity in the Digital Economy // Studies on Russian Economic Development. 2021. Vol. 32. № 1. Pp. 29-36. **DOI:** 10.1134/S1075700721010020