

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Парадокс капиталоемкости

© 2024 г. В.Е. Дементьев

В.Е. Дементьев,

чл.-корр. РАН, ЦЭМИ РАН, Москва, e-mail: vedementev@rambler.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024

Аннотация. Снижение капиталоемкости производства позволяет поддерживать экономический рост при низкой норме накопления капитала. Однако связь между развитием экономики знаний и динамикой капиталоемкости имеет сложный характер. В отдельные периоды времени она положительная, в другие — отрицательная. Допустимо рассуждать о существовании парадокса капиталоемкости по аналогии с парадоксом производительности (парадокс Солоу). Для выявления того, как может формироваться парадокс капиталоемкости, в статье строится математическая модель обновления технологической базы производства. Особенностью модели является как ее многофазный характер, так и разграничение инвестиций в текущее производство, фундаментальные исследования и прикладные разработки. При описании сферы фундаментальных исследований и сферы производства используются логистические функции. Они позволяют учесть существование положительного эффекта масштаба в этих сферах и то, что он сохраняется лишь до некоторого объема используемых ресурсов. В модели представлено не только чередование длинных волны технологического развития, но и наложение волн друг на друга. Важное свойство этой модели состоит в том, что смена фаз развития основывается на определенной экономической логике, а не задается экзогенно. Выполнен иллюстративный расчет по модели, в результате которого получена траектория изменения капиталоемкости производства. Конфигурация этой траектории близка к тому, как реально менялась капиталоемкость производства в экономике США в период 1960–2022 гг. Предложенная модель демонстрирует связь парадокса капиталоемкости с периодическим обновлением технологий широкого назначения, с порождаемыми этими обновлениями волнами Кондратьева.

Ключевые слова: капиталоемкость производства, накопление капитала, инвестиции в человеческий капитал, инвестиции в исследования и разработки, технологии широкого назначения, волны Кондратьева.

Классификация JEL: C63, E22, O11, O51.

УДК: 330.32.

Для цитирования: **Дементьев В.Е.** (2024). Парадокс капиталоемкости // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 27–39. DOI: 10.31857/S0424738824020037

ВВЕДЕНИЕ

В исследовании института МакКинзи «Продуктивность капитала», выполненного с участием Р. Солоу как консультанта, в качестве парадокса показано, что США могут создавать много нового богатства и относительно мало средств направлять на сбережения (Capital productivity, 1996, р. 1). Объяснение этого парадокса содержится в теории экономического роста М. Калецкого (Kalecki, 1954). Разработанная им модель экономической динамики помогает понять, почему рост ВВП в некоторых странах достигается при низкой норме накопления капитала. Ключевую роль в этом играет приростная капиталоемкость производства. Ее низкий уровень способен компенсировать то, что приростные инвестиции в основной капитал составляют относительно малую долю в ВВП. Поддерживать такой характер экономического роста помогает структурная политика, ставка на развитие менее капиталоемких отраслей, высокая доля инвестиций в человеческий капитал и в экономику знаний, что позволяет рассчитывать на снижение приростной капиталоемкости в качестве результатов таких инвестиций. С этой точки зрения важным ориентиром перевода экономики России на путь инновационного развития является повышение общего удельного веса инвестиций в ВВП — в основной и человеческий капиталы — эти две главные движущие силы социально-экономического роста (Аганбегян, 2023).



Рис. 1. Доля инвестиций в знания и человеческий капитал (левая шкала) в ВВП США (левая шкала, %) и капиталоемкость производства в США (правая шкала, %)

Источник: капиталоемкость производства рассчитана по данным Бюро экономического анализа США (Bureau of Economic Analysis, USA).

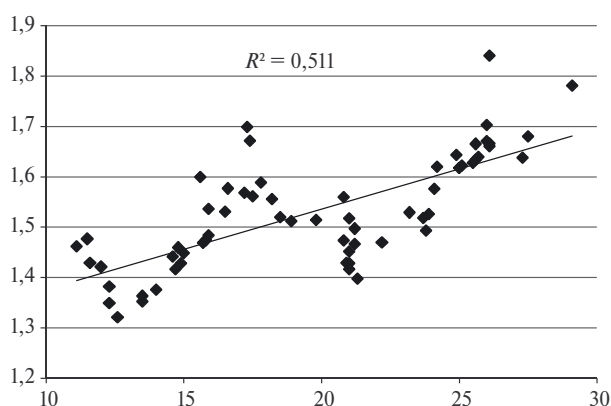


Рис. 2. Связь между капиталоемкостью производства (ось Y) и долей инвестиций в человеческий капитал и знания (ось X) в экономике США, %

Показателен уровень инвестиций в человеческий капитал и знания в экономике такой инновационной страны, как США. Доля в ВВП расходов на здравоохранение с 5% в 1960 г. выросла до 17% в 2009 г. и с тех пор не опускалась ниже этого уровня¹. Доля расходов на образование с 3,56% в 1960 г. выросла до 5,2% в 1970 г. и держится около этого уровня, временами приближаясь к 6%². Доля расходов на исследования и разработки в 1960 г. составляла 2,53%, однако после роста до 2,79% в 1964 г. она снизилась до 2,07% в 1978 г. и далее она колебалась около 2,5% в период 1982–2007 гг., но к 2023 г. выросла до 3,4%³. В целом совокупная доля инвестиций в человеческий капитал и знания в ВВП США выросла с 11,1% в 1960 г. до 27,5% в 2022 г.

На этом фоне обращает на себя внимание динамика капиталоемкости производства США. Как видно из графика на рис. 1, за наращиванием вложений в человеческий капитал и знания не обязательно следует повышение капиталоемкости (снижения капиталоемкости). В долгосрочном плане преобладает положительная связь между рассматриваемыми параметрами (рис. 2). При этом можно выделить периоды, в течение которых эта связь имеет отрицательный характер.

Ситуация напоминает ту, о которой Р. Солоу выразился следующим образом: «Компьютерный век можно увидеть везде, кроме статистики производительности» (Solow, 1987). В 1980-е годы в экономике США наблюдалось снижение производительности труда при ежегодном росте затрат на информационные технологии. Подобно тому, как эту ситуацию называют парадоксом производительности (парадоксом Солоу), можно рассуждать о парадоксе капиталоемкости. В течение длительных периодов может наблюдаться ее повышение, несмотря на рост инвестиций в развитие человеческого капитала и сферы знаний.

В статье предлагается объяснение этого парадокса с помощью теоретической модели технологического обновления производства. Иллюстративные расчеты демонстрируют возможность формирования такой траектории капиталоемкости, которая по конфигурации близка к наблюдаемой в реальности. Показано, что волнообразная динамика капиталоемкости связана с процессом смены доминирующих технологий широкого назначения.

¹ <https://www.cms.gov/data-research/statistics-trends-and-reports/national-health-expenditure-data/historical>

² https://www.usgovernmentspending.com/education_spending

³ <https://nces.nsf.gov/pubs/nsf24318/assets/data-tables/tables/nsf24318-tab001.pdf>

МЕСТО АНАЛИЗА КАПИТАЛОЕМКОСТИ В СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Как указывается в (Маевский, Рубинштейн, 2023), абстрагирование от волновой динамики капиталоемкости способно искажать результаты макроэкономических расчетов и ухудшать качество прогнозов. Отмечается, что существует реальная возможность учета изменений уровня капиталоемкости в гетеродоксальной модели переключающегося режима воспроизводства. Значения показателей капиталоемкости вводятся в эту модель на основе данных статистики США за период 1946–2019 гг. Волнообразный характер изменения капиталоемкости В.И. Маевский и А.А. Рубинштейн рассматривают как одно из проявлений больших циклов конъюнктуры Н.Д. Кондратьева. Однако механизм такой динамики капиталоемкости остается за рамками анализа переключающегося режима воспроизводства.

Резкая смена тенденций в динамике капиталоемкости практически обойдена вниманием в макроэкономических исследованиях. Это может быть следствием того, что анализ волн Кондратьева не включен в основной круг современных макроэкономических исследований. В литературе довольно часто обсуждение капиталоемкости сводится к тому, что не корректно сопоставлять рост экономики только с нормой накопления, игнорируя показатель приростной капиталоемкости. В (Лавровский, Чуваев, 2022) показано, что для развивающихся стран влияние нормы накопления на макроэкономическую динамику сопоставимо с влиянием прироста капиталоемкости. В группе развитых стран норма накопления если и воздействует положительно, то крайне незначительно, и доминантой здесь выступает отдача от капитала, а не его (относительный) объем.

Исследование влияния уровня капиталоемкости экономики на темпы экономического роста на основе статистических данных по экономикам Великобритании и Германии представлено в (Derkacz, 2020). Анализ подтвердил, что жизненно важными для динамики ВВП в этих странах являются не только потребление и инвестиции. Большое значение имеет капиталоемкость прироста выпуска.

На возможность немонотонного роста экономики в условиях технологического развития обращено внимание в исследованиях технологий широкого назначения. Исследования (Helpman, Trajtenberg, 1994; Bas, Nahujs, 2002) показывают, что, даже если новые технологии будут существенно более эффективными, на первых порах они едва ли смогут повлиять на рост экономики, поскольку им для значительного и длительного воздействия придется подождать формирования достаточно большого пула дополнительных активов. Более того, на создание таких активов расходуются ресурсы, и, следовательно, в краткосрочной перспективе это может негативно сказаться на росте. Однако динамика капиталоемкости пока не была предметом непосредственного анализа в исследованиях технологий широкого назначения, включая искусственный интеллект, при этом значительное внимание уделяется парадоксу производительности (Acemoglu et al., 2014; Brynjolfsson et al., 2019; Capello et al., 2022).

Растущая автоматизация производства, развитие искусственного интеллекта способствовали активизации изучения капиталовооруженности труда и перспектив занятости (Aghion et al., 2022; Ing, Grossman, 2022). Однако эти исследования не дают ответа на вопрос о динамике фондоотдачи/капиталоемкости производства.

МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБНОВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Технологическое развитие в долгосрочном плане рассматривается как процесс смены доминирующих технологий широкого назначения. В (Андрукович, 2023) отмечено, что в большинстве работ волны Кондратьева моделируются в виде дифференциальных уравнений различного вида и представляются как следующие друг за другом периодические колебания, так что начало новой волны приходится на окончание предыдущей и т.д. Однако исследования технологий широкого назначения свидетельствуют о том, что эти технологии и порождаемые ими длинные волны не следуют одна за другой, а накладываются друг на друга. При этом очередная технологическая волна начинает свой рост в период действия предыдущей, а ее влияние на экономические процессы не заканчивается в конце ее первого цикла, а работает и в дальнейшем, формируя многоукладность экономики (Глазьев, 1993; Дементьев, 2021). В этой связи оправдано введение в структуру технологической волны понятий «латентный период», «период ее лидерства» и «технологический след», как предложено в (Андрукович, 2023). Таким представлениям о длинноволновой динамике соответствует модель технологического обновления производства, приводимая в данной статье. В ней в отличие от моделей, содержащихся в (Дементьев, 2021, 2023), выделены инвестиции в фундаментальные и прикладные исследования.

Модель имеет дискретный характер, причем единичные циклы группируются в последовательные фазы развития экономической системы. Для каждого набора технологий широкого назначения будем различать:

а) накопление теоретических знаний в результате фундаментальных исследований об этих технологиях. В соответствии со степенью их изученности можно рассматривать теоретический потенциал технологий, поскольку накопленные теоретические знания служат основой для соответствующих прикладных разработок;

б) накопление прикладных знаний, от чего зависит практический потенциал данного набора технологий.

При описании сферы фундаментальных исследований и сферы производства воспользуемся логистическими функциями. Они позволяют учесть эффект масштаба в этих сферах и то, что он сохраняется лишь до некоторого уровня наращивания объема используемых ресурсов.

Формирование теоретического потенциала $A_f(t)$ происходит за счет накопления нематериальных активов (intangible capital) $K_f(t)$ сферы фундаментальных исследований:

$$A_f(t) = A_f / (1 + d_f e^{-b_f K_f(t)}),$$

где d_f, b_f, A_f — параметры влияния $K_f(t)$ на $A_f(t)$.

Практический потенциал $A(t)$ формируется в результате инвестиций в прикладные исследования и разработки:

$$A(t) = A_f(t) \left[1 - (1 + q K_a(t))^{-1} \right],$$

где q — фиксированный параметр; $K_a(t)$ — нематериальные активы (intangible capital), представляющие накопленные прикладные знания. С увеличением этих знаний практический потенциал приближается к теоретическому. Здесь для упрощения модели игнорируется, что на практике фундаментальные знания лишь частично трансформируются в прикладные.

В модели величина нематериальных активов фактически отождествляется с накопленным объемом инвестиций в соответствующие исследования.

Выпуск продукции в результате использования практического потенциала данного набора технологий описывает логистическая функция:

$$Y(t) = A(t) / (1 + d_c e^{-b_c K_c(t)}),$$

где $Y(t)$ — выпуск продукции в момент t ; d_c, b_c — фиксированные параметры производственной функции; $K_c(t)$ — используемые для этого выпуска материальные активы (tangible capital).

Наращивание активов разных видов происходит по принципу:

$$K_f(t+1) = K_f(t) + fY(t), \quad K_a(t+1) = K_a(t) + aY(t), \quad K_c(t+1) = rK_c(t) + cY(t),$$

где f — доля выпуска $Y(t)$, направляемая на инвестиции в сферу фундаментальных исследований; a — доля выпуска $Y(t)$, направляемая на инвестиции в сферу прикладных исследований; c — доля выпуска $Y(t)$, направляемая на инвестиции в производственную сферу; r — коэффициент остаточной стоимости материальных активов.

Можно исходить из того, что причиной активизации фундаментальных и прикладных исследований является ухудшение динамики отдачи от использования уже освоенных технологий.

Для простоты изложения допустим, что стоимость нематериальных активов не меняется.

Фаза 1. Описание процесса технологического развития начнем с положения, когда теоретический потенциал исходного набора технологий уже достиг высокого уровня. Другими словами, в начальный момент $t = 0$ уровень нематериальных активов сферы фундаментальных исследований $K_{1f}(0)$ таков, что позволяет существенно снижать капиталоемкость производства за счет накопления прикладных знаний. При исходном уровне этих знаний K_{1a} еще имеются резервы повышения капиталотдачи; $K_{1c}(0)$ — начальный объем материальных активов.

В рамках фазы 1 динамику производства определяют следующие соотношения:

$$\begin{aligned} K_{1f}(t) &= K_{1f}(t-1) + f_1 Y_1(t-1), & A_{1f}(t) &= A_{1f} / (1 + d_{1f} e^{-b_{1f} K_{1f}(t)}), \\ K_{1c}(t) &= r_1 K_{1c}(t-1) + c_1 Y_1(t-1), & K_{1a}(t) &= K_{1a}(t-1) + a_1 Y_1(t-1), \\ A_1(t) &= A_{1f}(t) \left[1 - (1 + q_1 K_{1a}(t))^{-1} \right], & Y_1(t) &= A_1(t) / (1 + d_1 e^{-b_1 K_{1c}(t)}). \end{aligned}$$

Фаза 2 наступает после того, как капиталоемкость производства, использующего данный набор технологий, практически перестает снижаться. В этой ситуации долгосрочные перспективы повышения ресурсоотдачи связаны с активизацией фундаментальных исследований, нацеленных на углубление знаний о новых технологиях широкого назначения, на поиски таких технологий. Обозначим время начала этой фазы через T_2 . После распределения выпуска $Y_1(T_2 - 1)$ все финансирование фундаментальных исследований направляются на изучение новых технологий.

Формирование теоретического потенциала $A_{2f}(t)$ нового набора технологий широкого назначения происходит за счет наращивания нематериальных активов (intangible capital) сферы фундаментальных исследований:

$$A_{2f}(t) = A_{2f} / \left(1 + d_{2f} e^{-b_{2f} K_{2f}(t)}\right),$$

где $K_{2f}(T_2) = K_{2f}(T_2 - 1) + f_2 Y_1(T_2 - 1)$. В дальнейшем в рамках фазы 2 имеем $K_{2f}(t+1) = K_{2f}(t) + f_2 Y_1(t)$. Однако продолжает поддерживаться накопление прикладных знаний о старых технологиях: $K_{1a}(t+1) = K_{1a}(t) + a_1 Y_1(t)$. Индексы при a, c, f, q, d, b, K, Y указывают на набор технологий широкого применения.

В рамках фазы 2 продолжаются инвестиции в материальные активы производства $Y_1(t)$:

$$K_{1c}(t) = r_1 K_{1c}(t-1) + c_1 Y_1(t-1).$$

Фаза 3. Накопление прикладных знаний о новых технологиях широкого назначения. Инвестиции в эти знания начинаются после достижения некоторого порогового уровня фундаментальных знаний. Допустим, что этот пороговый уровень представляет параметр δ и возможность перехода выявляется в момент $(T_3 - 1)$ при $A_{2f}(T_3 - 1) \geq \delta A_{2f}$. В таком случае фаза 3 начинается с T_3 :

$$K_{2a}(T_3) = a_{2a} Y_1(T_3 - 1), \quad K_{2a}(t) = K_{2a}(t-1) + a_{2a} Y_1(t-1).$$

Продолжаются инвестиции в фундаментальные исследования новых технологий:

$$K_{2f}(t+1) = K_{2f}(t) + f_2 Y_1(t).$$

Уровень прикладных знаний о новых технологиях следующим образом зависит от инвестиций в нематериальные активы

$$A_2(t) = A_{2f} \left[1 - \left(1 + q_2 K_{2a}(t)\right)^{-1} \right] / \left(1 + d_{2f} e^{-b_{2f} K_{2f}(t)}\right).$$

Для повышения практического потенциала старых технологий $A_1(t)$ продолжают финансироваться прикладные исследования и разработки на основе фундаментальных знаний и по этим технологиям $K_{1a}(t) = K_{1a}(t-1) + a_1 Y_1(t-1)$, а также продолжают инвестиции в материальные активы, воплощающие старые технологии: $K_{1c}(t) = r_1 K_{1c}(t-1) + c_1 Y_1(t-1)$.

Фаза 4 соответствует переходу к радикальным инновациям на основе новых технологий широкого назначения. Переход начинается в момент T_4 , после накопления значительного объема прикладных знаний об этих технологиях:

$$K_{2c}(T_4) = c_{21} Y_1(T_4 - 1), \quad Y_2(t) = A_2(t) / \left(1 + d_2 e^{-b_2 K_{2c}(t)}\right).$$

Продолжаются инвестиции в фундаментальные и прикладные исследования по новым технологиям:

$$K_{2f}(t+1) = K_{2f}(t) + f_2 (Y_1(t) + Y_2(t)), \quad K_{2a}(t+1) = K_{2a}(t) + a_2 (Y_1(t) + Y_2(t)).$$

Производство на старой технологической базе не ликвидируется. Накопление материальных активов для исходного набора технологий широкого назначения может как останавливаться, так и продолжаться. На практике инвестиции в ранее освоенные технологии в той или иной мере по разным причинам сохраняются, включая использование продукции этих технологий в качестве ресурсов для новых технологий. Если накопление материальных активов для исходного набора технологий прекращается, то с учетом износа объем этих активов начинает уменьшаться. При этом может сохраняться возможность для медленного и временного увеличения производства продукции $Y_1(t)$ за счет продолжающегося совершенствования методов использования старых технологий.

Фазы 5, 6, 7 по существу повторяют фазы 2, 3, 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЛЛЮСТРАТИВНЫХ РАСЧЕТОВ ПО МОДЕЛИ

Численные иллюстративные расчеты по построенной модели приведены в Приложении (см. табл. П). Там указаны значения всех исходных данных проведенных нами расчетов. В расчетах для инвестиций в материальные активы предшествующего набора технологий после фазы 3 использован вариант их полной остановки, а после фазы 6 — вариант продолжения инвестиций. Значение параметра δ , влияющего на смену фаз, принято в этих расчетах на уровне $\delta = 0,5$.

Результаты расчетов позволяют сопоставить полученную таким образом динамику капиталоемкости производства с фактическим изменением капиталоемкости производства в экономике США в 1960–2022 гг. На этот период пришлись две волны Кондратьева. Два раза происходило радикальное обновление технологии производства и в рамках иллюстративных расчетов по модели (рис. 3). Графики фактического изменения капиталоемкости и полученной в результате модельных расчетов траектории капиталоемкости оказались похожими (рис. 4).

Из графиков на рис. 3 и 4б видно, что снижение капиталоемкости приходится на периоды, когда начинает проявляться возрастающая эффективность масштаба производство по новой технологии. При убывающей эффективности масштабов производства меняется и динамика его капиталоемкости. Слом кривой (рис. 4б) при $t = 12$ связан с прекращением инвестиций в старую технологию. Однако при медленном освоении новой технологии снижение капиталоемкости начинается не сразу, при быстром же переходе к новой технологии удается избежать заминок в снижении капиталоемкости производства.

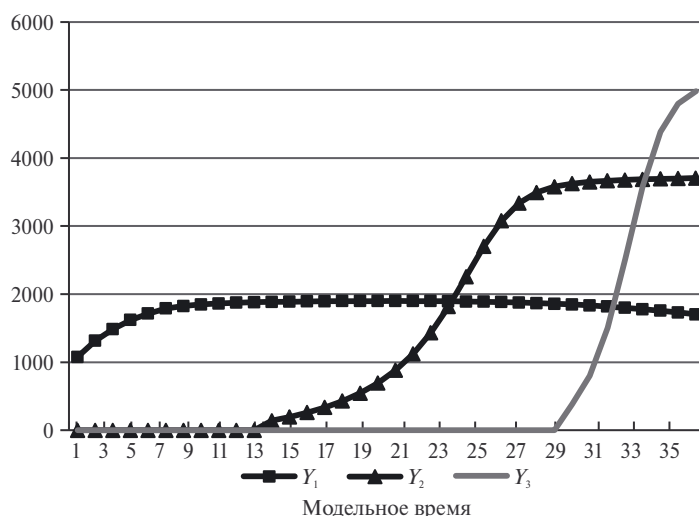


Рис. 3. Графики объемов производства по разным технологиям, усл. ед.

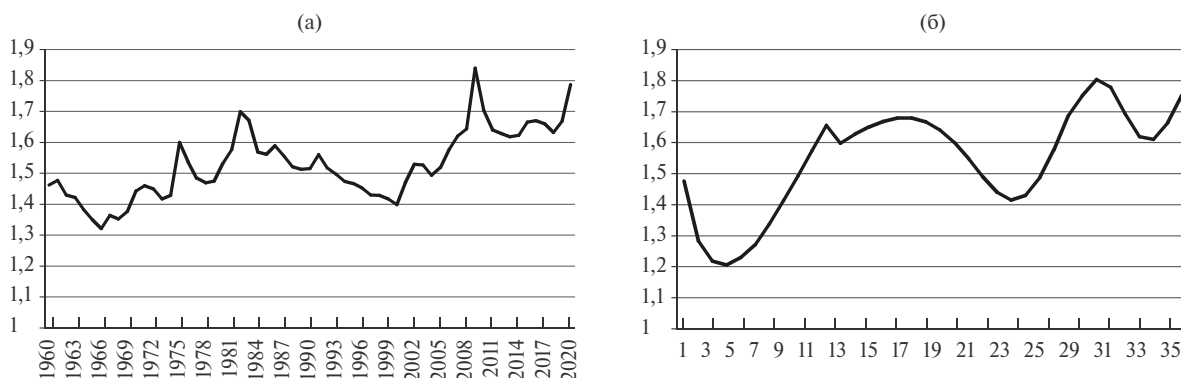


Рис. 4. Графики изменения капиталоемкости: а) в экономике США; б) в модели технологического развития (по результатам иллюстративных расчетов)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование закономерностей изменения капиталоемкости производства, влияющих на нее факторов имеет большое значение для сбалансированного экономического развития страны, для распределения ресурсов между инвестициями в текущее производство и инвестициями в активы, способные, хотя и не сразу, изменить характер и самого производства, и производственных отношений.

Важное свойство представленной модели и выполненных по ней иллюстративных расчетов состоит в том, что смена фаз развития основывается на определенной экономической логике, а не задается экзогенно. Это же можно утверждать и в отношении продолжительности фаз развития. Близость полученной из модели и фактической траектории капиталоемкости позволяет допустить, что заложенная в модель логика экономического развития не далека от реальности.

Воспроизведение выполненных расчетов, но уже на основе фактических данных, представляется весьма сложной задачей, ввиду того что волны технологического развития не просто сменяют друг друга, а сопряжены с технологическими метаморфозами. Разнесение технологий по разным волнам сильно затрудняет то, что часть старых производств после накопления улучшающих инноваций на основе новых технологий широкого назначения радикально меняют свой технологический характер. Так происходит, в частности, при роботизации традиционных отраслей, при смене их базовых технологий (переход на электрическую тягу железнодорожного и автомобильного транспорта). Природа технологий широкого назначения такова, что технологии очередной волны не ограничиваются только взаимодействием между собой, а проникают повсюду. Тем не менее, усилия, направленные на воспроизведение волнообразности технологического развития с помощью более структурированного описания экономической динамики, включая модели переключающегося режима воспроизводства, должны послужить сокращению дистанции между экономической теорией и стилизованными фактами. Представленную в статье динамику капиталоемкости производства можно отнести к таким фактам.

Таблица П. Иллюстративные расчеты по модели технологического обновления производства

Переменная	Исходные данные	Модельное время										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Фаза 1				Фаза 2						
A_{1f}	2000	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
f_1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$K_{1f}(t)$	5	15,00	25,77	38,92	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78
d_{1f}	5	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
b_{1f}	0,3	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
$A_{1f}(t)$		1894,76	1995,62	1999,91	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
a_1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$K_{1a}(t)$	10	30,00	51,54	77,84	107,57	139,99	174,31	210,09	246,60	283,58	320,85	358,32
q_1	0,8	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
$A_{1f}(t)$		1542,69	1699,68	1751,72	1784,88	1808,90	1839,34	1851,82	1861,96	1870,32	1877,35	1883,36
r_1	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
c_1	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
$K_{1c}(t)$	1500	1590,00	1687,44	1811,47	1953,64	2109,11	2272,83	2442,05	2612,30	2781,88	2949,86	3115,72
d_1	2500	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
b_1	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
$Y_1(t)$	1000	1077,04	1314,74	1486,68	1621,21	1715,89	1788,97	1825,69	1848,57	1863,47	1873,84	1881,54
A_{2f}	4000,00					4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00
f_2	0,01					0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$K_{2f}(t)$						16,21	33,37	51,26	69,52	88,00	106,64	125,38
d_{2f}	10,00					10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
b_{2f}	0,030					0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
$A_{2f}(t)$						559,55	855,68	1270,45	1783,79	2334,35	2840,96	3245,34
a_{2f}	0,02										0,02	0,02
$K_{2a}(t)$											37,27	74,75
q_2	0,20										0,20	0,20
$A_{2f}(t)$											1486,49	2065,14
K/Y		1,48	1,28	1,22	1,21	1,23	1,27	1,34	1,41	1,49	1,57	1,66

Продолжение таблицы П

Переменная	Модельное время												
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Фаза 4													
A_{1f}	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
f_1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$K_{1f}(t)$	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78
d_{1f}	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
b_{1f}	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
$A_{1f}(t)$	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
a_1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$K_{1d}(t)$	395,95	433,68	471,48	509,34	547,24	585,19	623,16	661,15	699,14	737,11	775,06	812,97	850,82
q_1	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
$A_{11}(t)$	1888,57	1892,92	1896,79	1900,25	1903,38	1906,22	1908,82	1911,21	1913,41	1915,45	1917,35	1919,12	1920,77
r_1	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
c_1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$K_{11}(t)$	3053,41	2992,34	2932,49	2873,84	2816,36	2760,04	2704,84	2650,74	2597,72	2545,77	2494,85	2444,96	2396,06
d_1	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
b_1	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
$Y_1(t)$	1886,23	1889,93	1892,98	1895,43	1897,30	1898,61	1899,32	1899,41	1898,83	1897,52	1895,39	1892,35	1888,29
A_{2f}	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00
f_2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$K_{2f}(t)$	144,19	163,05	181,95	200,88	219,84	238,81	257,80	276,79	295,78	314,77	333,75	352,70	371,62
d_{2f}	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
b_{2f}	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
$A_{2f}(t)$	3532,83	3720,61	3836,58	3905,72	3946,06	3969,29	3982,57	3990,12	3994,41	3996,83	3998,21	3998,98	3999,42
a_{2f}	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
K_{2a}	112,38	150,10	187,90	225,76	263,67	301,61	339,59	377,57	415,56	453,54	491,49	529,40	567,24
q_2	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
$A_{21}(t)$	2507,71	2832,49	3059,51	3214,44	3320,25	3393,97	3447,07	3486,88	3517,97	3543,18	3564,29	3582,41	3598,30
c_{21}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
c_{22}	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
r_2	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
$K_{22}(t)$	188,15	401,56	621,90	850,89	1090,80	1344,74	1616,97	1913,28	2241,43	2611,55	3036,15	3528,60	4098,75
d_2	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
b_2	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$Y_2(t)$	142,73	196,90	260,64	336,92	430,14	546,34	693,58	882,33	1125,34	1435,41	1818,15	2257,46	2701,69
K/Y	1,60	1,63	1,65	1,67	1,68	1,68	1,67	1,64	1,60	1,55	1,49	1,44	1,41

Продолжение таблицы П

Переменная	Модельное время										35	36
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34		
	Фаза 5			Фаза 6			Фаза 7					
A_{1f}	2000,00	2001,00	2002,00	2003,00	2004,00	2005,00	2006,00	2007,00	2008,00	2009,00	2010,00	2011,00
f_1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$K_{1f}(t)$	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78
d_{1f}	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
b_{1f}	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
$A_{1f}(t)$	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
a_1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$K_{1a}(t)$	888,58	926,25	963,78	1001,15	1038,33	1075,29	1111,98	1148,33	1184,31	1219,90	1255,03	1289,65
q_1	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
$A_{1f}(t)$	1922,32	1923,78	1925,15	1926,45	1927,67	1928,82	1927,74	1928,85	1929,90	1930,89	1931,84	1932,73
r_1	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
c_1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$K_{1f}(t)$	2348,14	2301,17	2255,15	2210,05	2165,85	2122,53	2080,08	2038,48	1997,71	1957,75	1918,60	1880,23
d_1	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
b_1	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
$Y_1(t)$	1883,09	1876,60	1868,68	1859,15	1847,84	1834,58	1817,11	1799,46	1779,30	1756,47	1730,81	1702,23
A_{2f}	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00
f_2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$K_{2f}(t)$	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62
d_{2f}	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
b_{2f}	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
$A_{2f}(t)$	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42
a_{2f}	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$K_{2a}(t)$	605,01	642,67	680,20	717,58	754,76	791,72	828,41	864,75	900,74	936,33	971,45	1006,07
q_2	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
$A_{2f}(t)$	3612,42	3624,91	3636,31	3646,76	3656,39	3665,28	3673,51	3681,14	3688,23	3694,84	3701,00	3706,75
c_{21}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
c_{22}	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Окончание таблицы П

Переменная	Модельное время											
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	Фаза 5			Фаза 6	Фаза 7							
r_2	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
$K_2(t)$	4745,95	5454,88	6201,31	6963,08	7725,54	8480,70	9224,57	9955,04	10671,42	11373,22	12060,20	12732,20
d_2	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
b_2	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$Y_2(t)$	3077,71	3339,36	3494,65	3579,04	3624,39	3650,14	3666,28	3677,65	3686,52	3693,99	3700,57	3706,53
A_{3f}	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00
f_3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$K_3(t)$	27,02	57,79	91,19	126,13	161,92	198,17	234,67	271,33	308,11	344,97	381,91	418,92
d_{3f}	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
b_{3f}	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
$A_{3f}(t)$	1101,66	2169,13	3639,60	4888,74	5567,51	5846,88	5947,89	5982,55	5994,20	5998,08	5999,37	5999,79
a_3	0,02			0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$K_{3a}(t)$				136,68	208,26	280,75	353,75	427,08	500,63	574,36	648,24	722,25
q_3	0,20			0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
$A_3(t)$				3424,26	4134,89	4503,12	4698,77	4817,08	4899,36	4962,71	5014,59	5058,64
r_3	0,98				0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
c_{32}	0,10				0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
c_{33}	0,05				0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$K_3(t)$					357,90	732,371	1122,78	1542,32	2005,01	2513,34	3051,82	3600,85
d_3	20,00				20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
b_3	0,002				0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
$Y_3(t)$					383,72	800,87	1507,29	2515,53	3595,44	4387,07	4800,06	4984,34
K/Y	1,43	1,49	1,58	1,69	1,75	1,80	1,78	1,69	1,62	1,61	1,66	1,75

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

- Аганбегян Г.А.** (2023). Инновации в России: от высокого знания и наличия перспективных научных заделов к эффективному социально-экономическому развитию // *Экономическое возрождение России*. № 2. С. 13–26. DOI: 10.37930/1990-9780-2023-2(76)-13-26 [Aganbegyan A.G. (2023). Innovations in Russia: From possessing the higher knowledge and promising scientific groundwork towards effective socio-economic development. *Economic Revival of Russia*, 2, 13–26. DOI: 10.37930/1990-9780-2023-2(76)-13-26 (in Russian).]
- Андрукович П.Ф.** (2023). Модели длинных волн Н.Д. Кондратьева для трех крупных стран Европы // *Экономическая наука современной России*. № 3. С. 47–66. DOI: 10.33293/1609-1442-2023-3(102)-47-66 [Andrukovich P.F. (2023). Kondratiev N.D. long wave models for three large European countries. *Economics of Contemporary Russia*, 3, 47–66. DOI: 10.33293/1609-1442-2023-3(102)-47-66 (in Russian).]
- Глазьев С.Ю.** (1993). Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: ВлaДap. [Glazyev S.Yu. (1993). *Theory of long-term technical and economic development*. Moscow: VlaDar (in Russian).]
- Дементьев В.Е.** (2021). Модель интерференции длинных волн экономического развития // *Компьютерные исследования и моделирование*. Т. 13. Вып. 3. С. 649–663. [Dementiev V.E. (2021). The model of interference of long waves of economic development. *Compute Research and Modeling*, 13, 3, 649–663 (in Russian).]
- Дементьев В.Е.** (2023). Обновление технологической базы экономики и реальные процентные ставки // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 3 (60). С. 104–119. DOI: 10.31737/22212264_2023_3_104-119, EDN: LBKSGQ [Dementiev V.E. (2023). Updating the technological base of the economy and real interest rates. *Journal of the New Economic Association*, 3 (60), 104–119. DOI: 10.31737/22212264_2023_3_104-119, EDN: LBKSGQ (in Russian).]
- Лавровский Б.Л., Чуваев А.В.** (2022). О соотношении экономической динамики и нормы накопления: международный опыт // *Проблемы прогнозирования*. № 2 (191). С. 6–16. DOI: 10.47711/0868-6351-191-6-16 [Lavrovskii B.L., Chuvaev A.V. (2022). On the relationship of economic dynamics and accumulation rate: International experience. *Studies on Russian Economic Development*, 2 (191), 6–16 (in Russian); 33, 2, 127–134. DOI: 10.1134/S1075700722020071 (in English).]
- Маевский В.И., Рубинштейн А.А.** (2023). Волны Кондратьева и современная макроэкономика // *Научные труды Вольного экономического общества России*. № 2. С. 87–110. DOI: 10.38197/2072-2060-2023-240-2-87-110 [Maevsky V.I., Rubinstein A.A. (2023). Kondratieff waves and modern macroeconomics. *Scientific Works of the Free Economic Society of Russia*, 2, 87–110. DOI: 10.38197/2072-2060-2023-240-2-87-110 (in Russian).]
- Acemoglu D., Autor D., Dorn D., Hanson G.H., Price B.** (2014). Return of the Solow paradox? IT, productivity, and employment in US manufacturing. *American Economic Review*, 104 (5), 394–399.
- Aghion P., Antonin C., Bunel S., Jaravel X.** (2022). The effects of automation on labor demand: A survey of the recent literature. In: *Robots and AI: A new economic era*. L.Y. Ing, G.M. Grossman (eds.). N.Y.: Routledge, 15–39. DOI: 10.4324/9781003275534-2
- Bas J., Nahuis R.** (2002). A general purpose technology explains the Solow paradox and wage inequality. *Economics Letters*, 74, 2, 243–250.
- Brynjolfsson E., Rock D., Syverson C.** (2019). Artificial intelligence and the modern productivity paradox: A clash of expectations and statistics. In: *The economics of artificial intelligence: An agenda*. Agrawal A., Cans J., Goldfarb A. (eds.). Chicago: University of Chicago Press, 23–60.
- Capello R., Lenzi C.** (2022). Giovanni Perucca the modern Solow paradox. In search for explanations. *Structural Change and Economic Dynamics*, 63, 66–180. DOI: 10.1016/j.strueco.2022.09.013
- Capital productivity** (1996). McKinsey Global Institute. Washington. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/capital-productivity>
- Derkacz A.J.** (2020). Capital intensity of investments and GDP dynamics. *SSRN Electronic Journal*. DOI:10.2139/ssrn.3639572
- Helpman E., Trajtenberg M.** (1994). A time to sow and a time to reap: Growth based on general purpose technologies. *National Bureau of Economic Research, Working paper 4854*. DOI: 10.3386/w4854
- Ing L.Y., Grossman G.M.** (eds.). (2022). *Robots and AI: A new economic era*. 1st ed. N.Y.: Routledge. DOI: 10.4324/9781003275534
- Kalecki M.** (1954). *Theory of economic dynamics. An essay on cyclical and long-run changes in capitalist economy*. London: Allen & Unwin Ltd. 178 p.
- Solow R.M.** (1987). We'd better watch out. *New York Times Book Review*, 36.

The paradox of capital intensity

© 2024 V.E. Dementiev

V.E. Dementiev,

*Corresponding member of the Russian Academy of Sciences; Central Economics and Mathematics Institute,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: vedementev@rambler.ru*

Received 22.03.2024

Abstract. Reducing the capital intensity of production makes possible to maintain economic growth at a low rate of capital accumulation. However, the relationship between the development of the knowledge economy and the dynamics of capital intensity is complex. In some periods it is positive, in others it is negative. It is acceptable to analyze the capital intensity paradox by analogy with the productivity paradox (Solow's paradox). To identify how the paradox of capital intensity can be formed, the article builds up mathematical model of updating the technological base of production. The peculiarity of the model is both its multiphase nature and the differentiation of investments in current production, in basic research, and in applied developments. Logistic functions are used to describe the field of basic research and the field of production. Such functions allow us to take into account the existence of a positive scale effect in these areas and the fact that it persists only up to a certain amount of resources used. The model shows not only the alternation of long waves of technological development, but also the overlapping of waves on each other. An important feature of this model is: the change of phases of development is based on a certain economic logic, and is not set exogenously. An illustrative calculation based on the model was performed, as a result of which the trajectory of changes in the capital intensity of production was obtained. The configuration of this trajectory is close to how the capital intensity of production in the US economy really changed in the period 1960–2022. The proposed model demonstrates the connection of the capital intensity paradox with the periodic updating of general-purpose technologies, with the Kondratiev waves generated by these updates.

Keywords: capital intensity of production, capital accumulation, investments in human capital, investments in research and development, general-purpose technologies, Kondratiev waves.

JEL Classification: C63, E22, O11, O51.

UDC: 330.32.

For reference: **Dementiev V.E.** (2024). The paradox of capital intensity. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 27–39. DOI: 10.31857/S0424738824020037 (in Russian).