

УДК: 330.42; 330.342; 330.356.2

## Модель интерференции длинных волн экономического развития

В. Е. Дементьев

Центральный экономико-математический институт РАН,  
Россия, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47

E-mail: vedementev@rambler.ru

*Получено 25.01.2021, после доработки — 03.04.2021.*

*Принято к публикации 04.04.2021.*

В статье обосновывается необходимость разработки и анализа математических моделей, учитывающих взаимное влияние длинных (кондратьевских) волн экономического развития. Анализ имеющихся публикаций показывает, что на модельном уровне прямые и обратные связи между пересекающимися длинными волнами до сих пор изучены недостаточно. Как свидетельствует практика, производства текущей длинной волны могут получать дополнительный импульс к росту со стороны технологий следующей длинной волны. Технологии очередной промышленной революции часто служат улучшающими инновациями для производств, рожденных предшествующей промышленной революцией. Как следствие, новая длинная волна увеличивает амплитуду колебаний траектории предшествующей длинной волны. Такого рода результаты взаимодействия длинных волн в экономике похожи на эффекты интерференции физических волн. Взаимовлияние спадов и подъемов экономик разных стран дает еще больше оснований для сопоставления последствий этого взаимовлияния с интерференцией физических волн. В статье представлена модель развития технологической базы производства, учитывающая возможности комбинирования старых и новых технологий. Модель состоит из нескольких подмоделей. Использование отличающегося математического описания для отдельных этапов обновления технологической базы производства позволяет учесть значительные различия между последовательными фазами жизненного цикла технологий широкого применения, рассматриваемых в современной литературе в качестве технологической основы промышленных революций. Одной из таких фаз является период формирования соответствующей инфраструктуры, необходимой для интенсивной диффузии новой технологии широкого применения, для быстрого развития использующих эту технологию отраслей. По модели выполнены иллюстративные расчеты при значениях экзогенных параметров, отвечающих логике смены длинных волн. При всей условности проведенных иллюстративных расчетов конфигурация кривой, представляющей изменение фондоотдачи в моделируемом периоде, близка к конфигурации реальной траектории фондоотдачи частных основных производственных фондов экономики США в период 1982–2019 гг. Указаны факторы, которые остались за рамками представленной модели, но которые целесообразно учитывать при описании интерференции длинных волн экономического развития.

Ключевые слова: длинные волны экономического развития, интерференция волн, технологии широкого применения, диффузия инноваций, улучшающие инновации, инфраструктура

UDC: 330.42; 330.342; 330.356.2

## The model of interference of long waves of economic development

V. E. Dementiev

Central Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
47 Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117418, Russia

E-mail: vedementev@rambler.ru

*Received 25.01.2021, after completion — 03.04.2021.*

*Accepted for publication 04.04.2021.*

The article substantiates the need to develop and analyze mathematical models that take into account the mutual influence of long (Kondratiev) waves of economic development. The analysis of the available publications shows that at the model level, the direct and inverse relationships between intersecting long waves are still insufficiently studied. As practice shows, the production of the current long wave can receive an additional impetus for growth from the technologies of the next long wave. The technologies of the next industrial revolution often serve as improving innovations for the industries born of the previous industrial revolution. As a result, the new long wave increases the amplitude of the oscillations of the trajectory of the previous long wave. Such results of the interaction of long waves in the economy are similar to the effects of interference of physical waves. The mutual influence of the recessions and booms of the economies of different countries gives even more grounds for comparing the consequences of this mutual influence with the interference of physical waves. The article presents a model for the development of the technological base of production, taking into account the possibilities of combining old and new technologies. The model consists of several sub-models. The use of a different mathematical description for the individual stages of updating the technological base of production allows us to take into account the significant differences between the successive phases of the life cycle of general purpose technologies, considered in modern literature as the technological basis of industrial revolutions. One of these phases is the period of formation of the appropriate infrastructure necessary for the intensive diffusion of new general purpose technology, for the rapid development of industries using this technology. The model is used for illustrative calculations with the values of exogenous parameters corresponding to the logic of changing long waves. Despite all the conditionality of the illustrative calculations, the configuration of the curve representing the change in the return on capital in the simulated period is close to the configuration of the real trajectory of the return on private fixed assets of the US economy in the period 1982-2019. The factors that remained outside the scope of the presented model, but which are advisable to take into account when describing the interference of long waves of economic development, are indicated.

**Keywords:** long waves of economic development, wave interference, general purpose technologies, diffusion of innovations, improving innovations, infrastructure

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 649–663 (Russian).

## Введение

Начавшаяся промышленная революция становится очередной сферой соперничества стран и корпораций. Для успешного участия в этом соперничестве важно понимание закономерностей радикального обновления технологической базы экономики. Большой вклад в решение этой задачи вносят исследования длинных, кондратьевских волн экономического развития [Perez, 2002; Grinin et al., 2020; Глазьев, 1993; Дубовский, 1995; Румянцева, 2005; Акаев, Садовничий, 2016].

Важным качеством соответствующих математических моделей является переход к описанию технологического прогресса как волнообразного, а не монотонного процесса. В этом одно из отличий моделей длинноволновой динамики от классических моделей экономического роста. Последние игнорируют наблюдаемые на практике периоды «шторма инноваций» [Mensch, 1979], дающие основания говорить о промышленных революциях.

Следует отметить обращение при моделировании длинных волн к логистическим функциям для описания траекторий отдельных показателей, макроэкономической диффузии инноваций [Меньшиков, Клименко, 1989; Акаев, Хироока, 2009; Акаев, Рудской, 2015]. Характер логистических функций соответствует существованию специфических периодов в жизненных циклах новых технологий, новых продуктов. Так, в [Чернавский и др., 2011, с. 769] речь идет о выделении участков производственной функции с постоянной, падающей и возрастающей отдачей. Снижающая отдача наблюдается, в частности, при низком спросе на производимую продукцию. Участок с повышающейся отдачей приходится на период активного роста потребности в инновационном продукте.

Логистическая функция позволяет учесть исчерпание возможностей существующего технологического способа производства. Как следствие, в повестке дня оказывается переход к новой технологической базе производства, к новой длинной волне экономического развития. Построенные с использованием логистических функций модели демонстрируют принципиальное значение нормы прибыли в формировании больших циклов конъюнктуры. Снижающаяся отдача от уже освоенного способа производства побуждает к поиску новых технологических решений.

А. А. Акаев и В. А. Садовничий [Акаев, Садовничий, 2016, с. 891] исходят из того, что на понижительной стадии длинной волны происходят только псевдоинновации, а внедрение новых технологий начитается только в фазе депрессии. Как следствие, в их модели длинные волны фактически не пересекаются, тогда как анализ реальных экономик свидетельствует об их технологической многоукладности [Глазьев, 1993]. Соответствующая такой практике схема пересечения длинных волн представлена в публикациях (см., например, [Perez, 2002]). Однако на модельном уровне прямые и обратные связи между соседними длинными волнами до сих пор изучены недостаточно.

Известная модель пересекающихся или перекрывающихся поколений (*overlapping generations model*) Самуэльсона–Даймонда [Diamond, 1965] имеет специфический характер. В этой модели экономические агенты разных поколений не участвуют одновременно в производственном процессе. Такое описание не подходит для перекрывающихся технологических поколений.

Оригинальная модель динамики разновозрастных подсистем экономики (модель переключающегося воспроизводства) разрабатывается коллективом Центра эволюционной экономики при Институте экономики РАН под руководством академика РАН В. И. Маевского [Маевский и др., 2019]. Один из вариантов этой модели представлен в [Кирилук, 2016]. Большим достоинством модели переключающегося воспроизводства является охват ею финансового механизма экономического роста. Однако процесс технологического развития в этой модели каждый раз замыкается в одной из подсистем и осуществляется ее собственными силами. В модели не предусмотрена возможность технологической кооперации подсистем.

Пересечение поколений инновационных технологий присутствует в моделях шумпетерианской динамики, описывающих эволюцию распределения мощностей по технологиям разной эффективности [Полтерович, Хенкин, 1988; Хенкин, Шананин, 2014]. Как отмечается в [Полте-

рович, 2017], эти модели позволяют говорить об аналогии между технологическим развитием и волновыми процессами в сплошных средах. Поскольку речь идет о совершенствовании производственных мощностей за счет инноваций и заимствования технологий более высокого уровня, допустимо интерпретировать его как симбиоз технологий.

Однако результаты обращения к новой технологии могут иметь разный характер. Одно дело — установка паровой машины на парусное судно как вспомогательного двигателя. Иной результат — пароход, где паровая машина становится основным двигателем. Такой переход от внедрения новой технологии в качестве улучшающей инновации к использованию ее в роли радикальной инновации характерен для многих технологий.

Улучшающие и радикальные инновации представлены в модели шумпетерианской динамики, построенной в [Acemoglu, Cao, 2015]. Предполагается, что уже существующие фирмы лишь совершенствуют используемую ими технику, а принципиально новые технические решения реализуют выходящие на рынок фирмы. Возможность таких решений выступать в двух ипостасях, как основа и для улучшающих, и для радикальных инноваций, не принимается во внимание.

Перекрывающиеся поколения инвестиций анализируются в моделях с винтажным капиталом (*vintage capital*). Имеется в виду капитал, исчисленный с учетом различных возрастных групп основных фондов. Эволюция соответствующих моделей анализируется в [Boucekkine et al., 2011]. Модели с винтажным капиталом допускают повышение эффективности ранее осуществленных инвестиций. Это может достигаться за счет накопления опыта при использовании устаревающих капитальных благ как в модели К. Эрроу 1962 г. [Arrow, 1962]. Вариант повышения эффективности в результате синергии разновозрастных инвестиций не рассматривается.

Эффекты комбинирования технологий разных длинных волн до сих пор остаются на периферии исследований долгосрочного экономического развития. Как следствие, за рамками моделей экономической динамики оказываются ситуации, когда привлечение в отрасли текущей длинной волны технологий следующей волны дает значительный, но временный эффект, а в итоге завершается ликвидацией модернизированных мощностей. Причем причиной этой ликвидации выступает не столько износ этих мощностей, сколько рост конкурентоспособности производств, использующих те же самые новые технологии, но уже для радикальных инноваций. Хотя отношения конкуренции между поколениями инновационных технологий — важный аспект инновационной динамики [Кузнецов, Маркова, 2017], весьма существенную роль играет и симбиоз разновозрастных инноваций.

Представленная способность производств текущей длинной волны получать дополнительный импульс к росту со стороны технологий новой длинной волны обсуждается в следующем, втором разделе статьи. Отмечается некоторая похожесть результатов взаимовлияния технологий разных длинных волн в экономике на эффекты интерференции физических волн.

В третьем разделе статьи представлена модель многоэтапного формирования новой технологической базы производства, учитывающая возможности комбинирования технологий.

В четвертом разделе показаны результаты иллюстративных расчетов по построенной модели.

В заключении указываются факторы, которые остались за рамками представленной модели, но которые целесообразно учитывать при описании интерференции длинных волн экономического развития.

## **Интерференция длинных волн экономического развития**

Интенсивность взаимовлияния длинных волн зависит от того, в какой мере происходит их пересечение. Оно тем больше, чем раньше в ходе текущей длинной волны начинает формироваться следующая волна. Мнения на этот счет сильно расходятся.

Так, в концепции Г. Менша [Mensch, 1979] своего рода «спусковым крючком» для начала внедрения принципиально новых технологий служит экономическая депрессия, наступающая

после исчерпания возможностей улучшающих инноваций. При этом не учитывается, что одним из источников таких инноваций могут быть как раз новые технологии. С депрессией связывает начало нового цикла и М. Хироока [Hirooka, 2006].

Иной позиции придерживается К. Перес [Perez, 2002], относящая начало коммерциализации технологий новой волны к периоду процветания предшествующей волны. О высокой восприимчивости экономики в этот период к новым идеям пишет и С. Ю. Румянцева [Румянцева, 2005, с. 38].

Технологии следующей волны способны усиливать подъем текущей волны, выступая в качестве улучшающих инноваций. Так, паровые двигатели довольно долго служили средством облегчения швартовки парусных судов. Полупроводниковые технологии постепенно вытесняли лампы из телевизоров, повышая их надежность. Статус базисных инноваций новые технологии обретают после фазы депрессии спадающей длинной волны.

В свою очередь, состояние производств, основывающихся на технологиях текущей длинной волны, влияет на скорость диффузии технологий следующей длинной волны. Темпы роста новых отраслей зависят от снабжения их материальными и финансовыми ресурсами со стороны ранее сформировавшихся производств. Спрос, предъявляемый традиционными производствами на новые технологии, помогает этим технологиям преодолеть весьма сложную полосу начального развития. Однако активная переориентация конечного спроса на продукты и услуги новых отраслей способна привести к чрезмерному спаду (отрицательному пузырю) производств нисходящей волны.

Последствия такого рода взаимовлияния пересекающихся длинных волн в некоторой мере похожи на эффект интерференции физических волн. Имеется в виду взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга. Речь идет о некотором сходстве именно эффектов пересечения волн, проявляющемся в изменении их амплитуды. Не утверждается, что одинаковый характер имеет природа таких изменений. Если физические волны могут распространяться во времени и в физическом пространстве, экономические длинные волны происходят во времени и в технологическом пространстве. Последствия интерференции кондратьевских волн возникают в результате комбинирования относящихся к разным волнам технологий, соответствующих синергических эффектов. Приближающиеся к фазе упадка технологии одной длинной волны способны обретать второе дыхание, соединяясь с переживающими фазу освоения технологиями следующей волны.

При использовании термина «длинная волна» оттесняются на второй план принципиальные изменения в технологической базе производства, которые фактически и вызывают своего рода пульсацию экономического развития. Этим можно объяснить стремление К. Перес [Perez, 2002] дистанцироваться от использования длинноволновой терминологии. Однако такая терминология стала привычной в научной среде и сохраняется поэтому в настоящей статье. Тем не менее акцент на интерференцию технологий разных промышленных революций возвращает эти революции на авансцену анализа.

Важным свойством длинноволновой динамики являются наблюдаемые на практике заминки в подъеме длинной волны. М. Хироока [Hirooka, 2006] констатирует, что распространение новшеств довольно часто задерживается различными экономическими бурями. Без ответа на вопрос о том, не возникают ли предпосылки для таких бурь в самом механизме длинноволнового развития, картина этого развития остается не полной.

В этой связи необходимо обратить внимание на исследования технологий широкого применения (*general purpose technology*). В качестве важнейших технологий широкого применения фигурируют паровой двигатель, электричество, двигатель внутреннего сгорания, микроэлектронные технологии. Фактически речь идет о технологиях, с которыми связаны промышленные революции, длинные волны экономического развития.

Понять причины неоднозначного влияния новой технологии на темпы экономического роста помогают шумпетерианские модели с технологиями широкого применения [Helpman, Trajtenberg, 1998]. Как показывают такие модели, для повышения темпов роста в перспективе

приходится идти на снижение выпуска продукции в более близкий период [Aghion, Howitt, 1998, ch. 8]. Основная идея этих моделей состоит в том, что новая технология широкого применения требует своего набора используемых комплектующих, для разработки которых приходится отвлекать ресурсы из текущего производства.

Отталкиваясь от результатов этого моделирования, можно следующим образом представить возникновение двух пульсаций при подъеме длинной волны. На первых порах (в рамках первой пульсации) внедрение новых технологий происходит за счет использования возможностей уже существующих отраслей, приспособляясь к их запросам, к уже имеющимся ресурсам и полуфабрикатам. Это не позволяет в полной мере реализовать потенциал новой технологии широкого применения. Когда значительные ресурсы начинают отвлекаться в сферу создания новых промежуточных производств, это временно ухудшает динамику конечного продукта. После того как предложение необходимых компонентов достигает некоторого критического уровня, ситуация принципиально меняется. Открывается перспектива возобновления роста новых отраслей, их последующей кластеризации (второй пульсации длинной волны).

Если первая пульсация длинной волны соответствует широкому использованию принципиально новых технологий как улучшающих, то вторая пульсация — результат смены базисных технологий, вытеснения некоторых звеньев из технологических цепочек, формирования новых технологических совокупностей на основе взаимодополняющих (кластеров) инноваций. Таким образом, возникающие в ходе подъема длинной волны пульсации связаны, во-первых, с насыщением спроса отраслей текущей волны на улучшающие инновации, основывающиеся на технологиях следующей волны. Во-вторых, для перехода от фрагментарного к полномасштабному использованию этих технологий требуются разработка и освоение целого ряда взаимодополняющих инноваций. Так, для успешного производства металлических корпусов паровых котлов потребовалась своего рода революция в металлообработке. При снижении в переходный период инновационной активности в производственной сфере к нему применима характеристика «инновационная пауза» [Полтерович, 2009].

Интенсивная диффузия новых технологий, быстрое развитие новых отраслей обычно предполагают формирование соответствующей инфраструктуры. Массовая автомобилизация экономики, например, невозможна без развития дорожной сети. Широкое использование паровых котлов началось после радикальной перестройки портового хозяйства. Для перехода к мобильным сетям пятого поколения 5G требуются весьма крупные инфраструктурные инвестиции. Как указывает М. Хироока [Hirooka, 2006], от состояния инфраструктуры зависят не только темпы распространения нововведений, но и возникновение синергических эффектов в инновационной сфере. Такая констатация связи длинных волн и изменений в экономической инфраструктуре сближает труды М. Хироока с теорией длинных волн Н. Д. Кондратьева, в которой ключевую роль играет обновление основных капитальных благ, имеющих во многом инфраструктурное происхождение [Кондратьев, 1993].

Инфраструктурная поддержка очередной технологии широкого применения сама может основываться на новых технологиях. Так, система спутников и соответствующие технологии — один из вариантов обеспечения мобильной связи. С другой стороны, не отличающиеся принципиальной новизной технологии строительства автомобильных дорог привели к массовому использованию такой технологии широкого применения, как двигатель внутреннего сгорания. Традиционные телефонные линии (инфраструктура электросвязи) в конце прошлого века позволяли предоставлять доступ к интернету через модем.

Выше говорилось об интерференции наслаивающихся длинных волн применительно к экономическому развитию отдельной страны. Еще больше оснований для сопоставления интерференции физических волн и взаимовлияния пульсаций экономического развития разных стран. Так, трансграничная диффузия инноваций, импорт комплектующих, необходимых для производств очередной длинной волны, могут увеличивать достижимый уровень экономического развития страны. С другой стороны, кризис, обусловленный избытком мощностей в отраслях нисходящей волны отдельной страны, ударяет по этим отраслям и в других странах.

Значительные различия между последовательными этапами жизненного цикла технологий широкого применения оправдывают использование отличающегося математического описания для отдельных этапов обновления технологической базы производства.

## Модель многоэтапного формирования новой технологической базы производства

Модель описывает переход от производства на основе одной (первой) технологии к производству, использующему две (первую и вторую) технологии. Особенностью модели является учет возможности второй технологии выступать в качестве улучшающей для первой. Кроме того, принимается во внимание, что для производства продукции на основе новой (второй) технологии большое значение может иметь наличие соответствующей инфраструктуры. Как известно, Н. Д. Кондратьев связывал продолжительность большого цикла конъюнктуры со средним сроком жизни производственных инфраструктурных сооружений, которые являются одним из основных элементов капитальных благ общества [Кондратьев, 1993].

На всех этапах моделируемой смены длинных волн производство благ, услуг описывается с помощью функции Ферхюльста (логистической кривой).

### Этап 1

На первом этапе производственная функция, описывающая выпуск продукции на основе исключительно первой технологии, имеет вид

$$Y_{11}(K_{11}(t)) = \frac{A_1}{1 + d_1 e^{-b_1 K_{11}(t)}}, \quad (1)$$

где  $A_1$  характеризует потенциал производства (наращивания выпуска) при данной технологии,  $d_1$  задает стартовые позиции при начале выпуска продукции,  $b_1$  влияет на скорость исчерпания потенциала,

$$K_{11}(t) = \mu_{11} K_{11}(t-1) + s_{11} Y_{11}(t-1) \quad (2)$$

— величина основных фондов, воплощающих рассматриваемую технологию (первую),  $(1 - \mu_{11})$  — коэффициент выбытия основных фондов,  $s_{11}$  — норма сбережений (доля выпускаемой продукции, направляемой на пополнение основных фондов).

Будем исходить из того, что изменения в режиме технологического развития являются реакцией на падение фондоотдачи.

Целесообразно остановиться на свойствах функции фондоотдачи, когда производственная функция имеет логистический характер.

Изменение фондоотдачи описывает функция  $F(K)$ :

$$F(K) = \frac{A}{(1 + d e^{-bK})K}. \quad (3)$$

Производная функции (3) имеет вид

$$F'(K) = \frac{A e^{bK} (dbK - d - e^{bK})}{(d + e^{bK})^2 K^2}. \quad (4)$$

Точки локальных экстремумов функции  $F(K)$  соответствуют решениям уравнения

$$dbK - d - e^{bK} = 0.$$

Если  $d > e^2$ , то при малых значениях  $K$  и при  $K \rightarrow \infty$   $F'(K) < 0$ , т. е. фондоотдача снижается. При этом при средних значениях  $K$ , удовлетворяющих соотношению  $dbK - d - e^{bK} > 0$ ,  $F'(K) > 0$ , т. е. фондоотдача растет.

Логистический характер производственной функции позволяет моделировать переходы от одной динамики фондоотдачи к другой. Для наглядности проиллюстрируем такую возможность с помощью графика функции  $F(K)$  при  $A = 50$ ,  $d = 20$ ,  $b = 0.13$  (рис. 1).

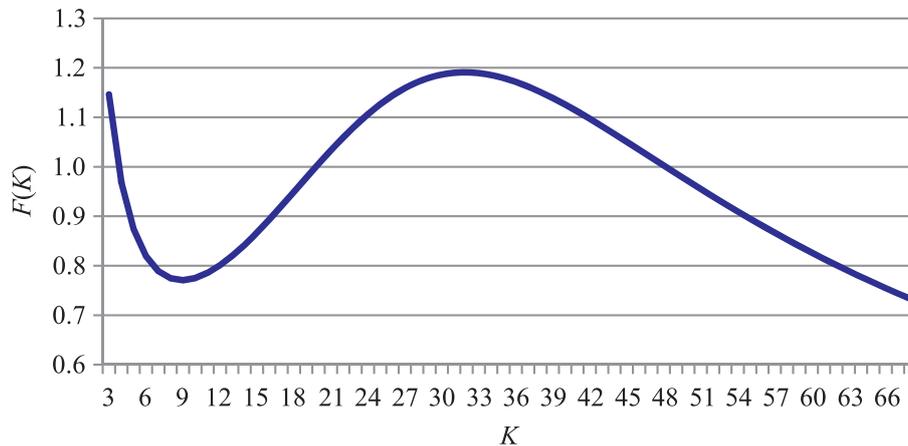


Рис. 1. Возможные изменения фондоотдачи при логистической производственной функции

Допустимо считать, что фаза зрелости в развитии первой технологии наступает в момент  $T_1$ , когда рост фондоотдачи в системе (1)–(2) сменяется ее снижением.

## Этап 2

На этом этапе для улучшения производства, основывающегося на технологии 1, начинают использоваться комплектующие, воплощающие технологию 2. Эффект использования этих комплектующих проявляется в увеличении потенциала улучшаемого производства. Величина его потенциала в момент  $t$  приобретает значение

$$A_1(1 + \lambda_{12}Y_{22}(t)), \quad (5)$$

где коэффициент  $\lambda_{12}$  характеризует способность новой технологии (новых комплектующих)  $Y_{22}$  увеличить потенциал старой технологии.

Производственная функция на основе улучшенной первой технологии:

$$Y_{12}(K_{12}(t), K_{22}(t)) = \frac{A_1(1 + \lambda_{12}Y_{22}(K_{22}(t)))}{1 + d_1 e^{-b_1 K_{12}(t)}}. \quad (6)$$

Производственная функция для технологии 2, по которой пока производятся только комплектующие, имеет вид

$$Y_{22}(K_{22}(t)) = \frac{A_2}{1 + d_2 e^{-b_2 K_{22}(t)}}. \quad (7)$$

Наращивание основных фондов обеих технологий идет за счет результатов производства по улучшенной первой технологии:

$$K_{12}(t) = \mu_{12}K_{12}(t-1) + s_{12}Y_{12}(t-1), \quad (8)$$

$$K_{22}(t) = \mu_{22}K_{22}(t-1) + s_{22}Y_{12}(t-1). \quad (9)$$

Первый выпуск продукции в рамках этапа 2 происходит при

$$K_{12}(T_1 + 1) = \mu_{12}K_{11}(T_1) + s_{12}Y_{11}(T_1), \quad (10)$$

$$K_{22}(T_1 + 1) = s_{22}Y_{11}(T_1). \quad (11)$$

Этап 2 продолжается до исчерпания возможностей повышения фондоотдачи за счет использования компонентов технологии 2 в качестве улучшающих технологию 1 инноваций, то есть до тех пор, когда рост фондоотдачи сменяется ее снижением.

$T_2$  — время завершения этапа 2, если

$$F_2(K_{12}(T_2), K_{22}(T_2)) < F_2(K_{12}(T_2 - 1), K_{22}(T_2 - 1)), \quad (12)$$

где

$$F_2(K_{12}(t), K_{22}(t)) = \frac{A_1(1 + \lambda_{12}Y_{22}(K_{22}(t)))}{[1 + d_1e^{-b_1K_{12}(t)}](K_{12}(t) + K_{22}(t))}. \quad (13)$$

Предположим, что к моменту  $T_2$  уже освоено производство столь широкого набора компонентов технологии 2, который позволяет перейти к производству готовой продукции на базе этой технологии.

Следует отметить, что достижение такого уровня развития технологии 2 может рассматриваться как самостоятельный критерий перехода к следующему этапу.

### Этап 3

Особенностью третьего этапа является выход производства по технологии 2 за рамки выпуска комплектующих для производства, основывающегося на первой технологии. Таким образом, начинается формирование отраслей, выпускающих конечную продукцию по технологии 2.

В этот период прекращается наращивание основных фондов, воплощающих технологию 1. Производство по этой технологии продолжается за счет накопленных к концу этапа 2 ресурсов  $K_{12}(T_2)$ .

$$K_{13}(T_2 + 1) = \mu_{13}K_{12}(T_2), \quad (14)$$

$$K_{13}(t) = \mu_{13}K_{13}(t - 1). \quad (15)$$

Вывод из эксплуатации воплощающих старую технологию основных фондов может в переходный период даже ускоряться. Такой ситуации соответствует уменьшение коэффициента  $\mu_{13}$ .

Производственная функция, описывающая выпуск продукции по технологии 1 при обеспеченности улучшающими комплектующими по технологии 2, сохраняет прежний вид:

$$Y_{13}(K_{13}(t), K_{23}(t)) = \frac{A_1(1 + \lambda_{13}Y_{23}(K_{23}(t)))}{1 + d_1e^{-b_1K_{13}(t)}}. \quad (16)$$

Однако исчерпание возможностей для улучшения технологии 1 за счет технологии 2 учитывается в модели через уменьшение коэффициента  $\lambda$ :

$$\lambda_{13} < \lambda_{12}.$$

Производственная функция, описывающая выпуск продукции по технологии 2, сохраняет прежний вид:

$$Y_{23}(K_{23}(t)) = \frac{A_2}{1 + d_2e^{-b_2K_{23}(t)}}. \quad (17)$$

Все накапливаемые ресурсы направляются на развитие новых технологических направлений, основой которых является технология 2:

$$K_{23}(t) = \mu_{23}K_{23}(t-1) + s_{13}Y_{13}(t-1) + s_{23}Y_{23}(t-1). \quad (18)$$

Этап 3 завершается в момент  $T_3$ , когда в системе из двух производств оказываются исчерпанными возможности повышения фондоотдачи без создания необходимой для технологии 2 инфраструктуры.

#### Этап 4

Пусть  $Y_{34}(t)$  характеризует состояние инфраструктуры, необходимой для развития производства или сбыта конечной продукции по технологии 2,  $A_3$  — потенциал развития инфраструктуры,

$$Y_{34}(k_{34}(t)) = \frac{A_3}{1 + d_3 e^{-b_3 K_{34}(t)}}, \quad (19)$$

$$K_{34}(t) = \mu_{34}K_{34}(t-1) + s_{24}Y_{24}(t-1), \quad (20)$$

где  $(1 - \mu_3)$  — коэффициент выбытия инфраструктурных основных фондов.

Выпуск конечной продукции по технологии 2 теперь представляет функция

$$Y_{24}(K_{24}(t), k_{34}(t)) = \frac{A_2(1 + \lambda_{24}Y_{34}(K_{34}(t)))}{1 + d_2 e^{-b_2 K_{24}(t)}}, \quad (21)$$

$$K_{24}(t) = \mu_{24}K_{24}(t-1) + s_{14}Y_{14}(t-1) + s_{24}Y_{24}(t-1). \quad (22)$$

$\lambda_{24}$  характеризует влияние инфраструктуры на развитие отраслей, базирующихся на технологии 2.

Описание выпуска продукции по технологии 1 на этапе 4 аналогично тому, что было на этапе 3. Однако влияние производства по технологии 2 на производство по технологии 1 продолжает снижаться, поэтому

$$\lambda_{14} < \lambda_{13}.$$

Этап 4 продолжается до исчерпания возможностей повышения фондоотдачи за счет развития инфраструктуры для производства по технологии 2. Этап 4 завершается в момент  $T_4$ , когда

$$\frac{Y_{14}(T_4) + Y_{24}(T_4) + Y_{34}(T_4)}{K_{14}(T_4) + K_{24}(T_4) + K_{34}(T_4)} < \frac{Y_{14}(T_4 - 1) + Y_{24}(T_4 - 1) + Y_{34}(T_4 - 1)}{K_{14}(T_4 - 1) + K_{24}(T_4 - 1) + K_{34}(T_4 - 1)}. \quad (23)$$

В качестве следующего может рассматриваться этап, на котором появляется принципиально новая технология, компоненты которой способны выступать улучшающими инновациями для технологии 2. В этом отношении очередной этап 5 близок к этапу 2.

## Иллюстративный расчет по модели комбинирования технологий

Для иллюстративных расчетов зафиксируем численные значения параметров модели (таблица 1).

При указанных значениях параметров траектории  $Y_1$ ,  $Y_2$  и  $Y_3$  приобретают вид, представленный на рис. 2. Темп моделируемых в этих расчетах процессов приближается к реальным темпам смены длинных волн, если принять шаг модели (единичный интервал) равным двум календарным годам.

Таблица 1. Используемые значения параметров модели

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Этап 1. Использование только технологии 1					
$A_1$	50	$b_1$	0.13	$s_{11}$	0.2
$K_{11}(0)$	20	$d_1$	20	$\mu_{11}$	0.93
Этап 2. Использование технологии 2 для улучшения технологии 1					
$A_2$	40	$b_2$	0.13	$s_{12}$	0.1
$\lambda_{12}$	0.03	$d_2$	20	$s_{22}$	0.1
		$\mu_{22}$	0.93	$\mu_{12}$	0.93
Этап 3. Освоение производства конечной продукции по технологии 2					
$\lambda_{13}$	0.02	$\mu_{13}$	0.9	$s_{13}$	0.05
		$\mu_{23}$	0.93	$s_{23}$	0.15
Этап 4. Раскрытие потенциала технологии 2 при формировании необходимой инфраструктуры					
$A_3$	45	$b_3$	0.13	$s_{14}$	0.05
$\lambda_{14}$	0.01	$d_3$	20	$s_{24}$	0.1
$\lambda_{24}$	0.02	$\mu_{34}$	0.96	$s_{34}$	0.05

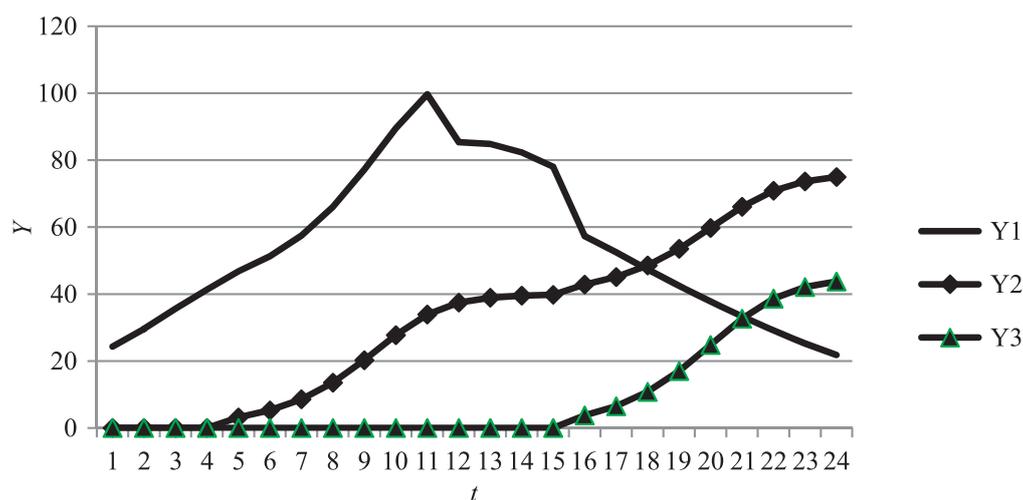


Рис. 2. Траектории развития производств по технологиям 1 и 2 и инфраструктуры.  
 Этап 1:  $0 \leq t \leq 4$ ; этап 2:  $5 \leq t \leq 11$ ; этап 3:  $12 \leq t \leq 15$ ; этап 4:  $16 \leq t \leq 25$

## Заключение

Одна из целей настоящей статьи — привлечь внимание к моделированию прямых и обратных связей между пересекающимися длинными волнами экономического развития.

При всей условности проведенных иллюстративных расчетов конфигурация кривой, представляющей изменение фондоотдачи в этих расчетах (рис. 3), довольно близка к конфигурации реальной траектории фондоотдачи частных основных производственных фондов экономики США в период 1982–2019 гг. (рис. 4). На эти годы пришлось как становление в США технологического уклада на основе микроэлектронных технологий, так и формирование запроса на очередное обновление технологической базы производства. Переход к новой технологии, приближение к границам ее возможностей демонстрирует и иллюстративный расчет по модели. С этой точки зрения рис. 3 и 4 отражают свойство близких по характеру процессов.

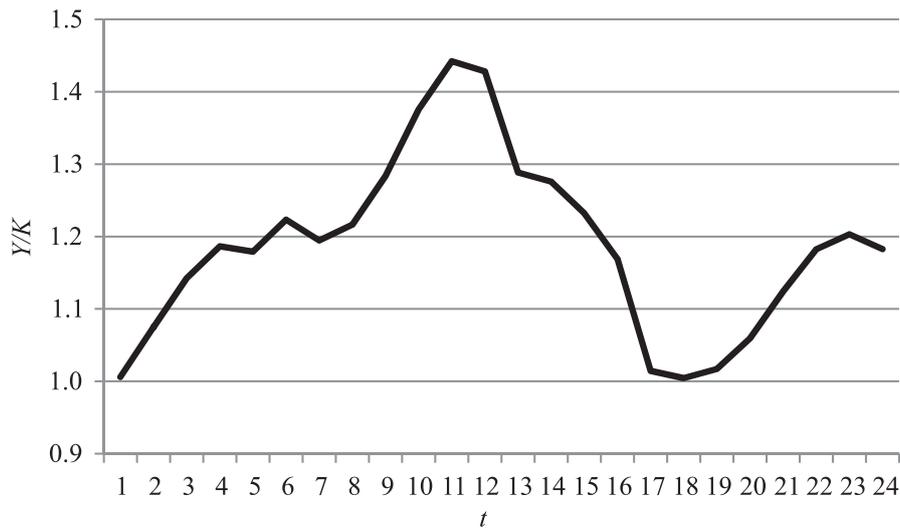


Рис. 3. Траектория фондоотдачи при иллюстративных расчетах по модели.  
Этап 1:  $0 \leq t \leq 4$ ; этап 2:  $5 \leq t \leq 11$ ; этап 3:  $12 \leq t \leq 15$ ; этап 4:  $16 \leq t \leq 25$

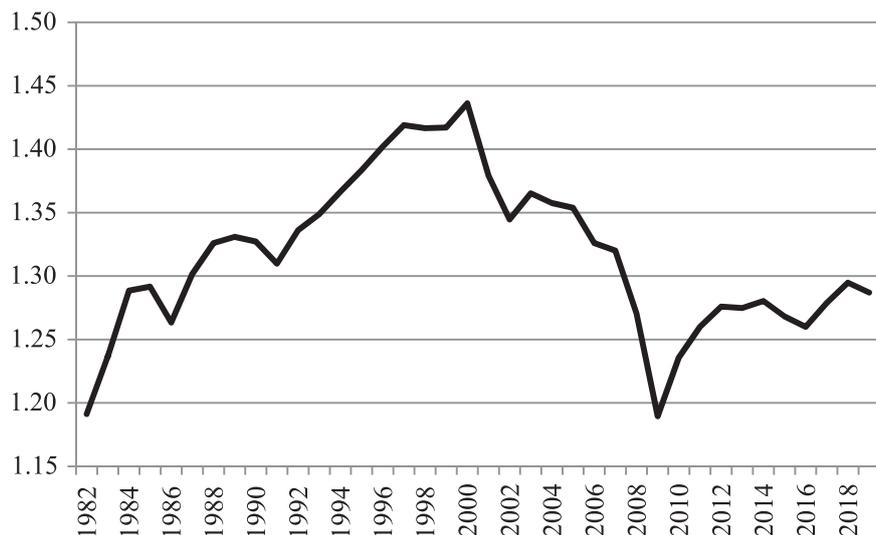


Рис. 4. Траектория фондоотдачи частных основных производственных фондов экономики США в период 1982–2019 гг.

Источник: Рассчитано по данным US Bureau of Economic Analysis: Table Gross Output by Industry, Table 1.1. Current-Cost Net Stock of Fixed Assets and Consumer Durable Goods

Ряд существенных связей остался за рамками построенной модели. Однако в «каждой науке модели строятся в два этапа: сначала формулируются так называемые базовые (простейшие) модели. Они содержат небольшое число переменных и уравнений, но при этом описывают суть явления (автоколебания, кризисы и т. д.). Применительно к конкретным условиям базовые модели усложняются, дополняются, комбинируются и превращаются в имитационные модели» [Чернавский и др., 2011, с. 769].

Цикл развития новой технологической базы производства в рамках изложенной многоэтапной модели выглядит следующим образом:

- 1) внедрение принципиально новых технологий в качестве улучшающих инноваций;
- 2) становление производства новых продуктов на основе этих технологий;

- 3) массовое производство и использование такой продукции на основе создания необходимой инфраструктуры;
- 4) модернизация производства с помощью улучшающих инноваций, использующих технологии следующей промышленной революции;
- 5) переход завершающих жизненный цикл технологий на вторые роли в экономике.

Если иметь в виду фигурировавшую в модели технологию 2, то последние два этапа ее жизненного цикла в расчетах не представлены. В формализованном виде они соответствуют описанию этапов 2 и 3 для технологии 1. Можно говорить о цикле, состоящем из пяти этапов. Эффект интерференции возникает при пересечении предпоследнего этапа текущей длинной волны и первого этапа новой волны.

К упрощениям модели можно отнести игнорирование существующего на практике переходного периода между появлением новых продуктов и формированием новых отраслей. В этот период тестируются и выявляются перспективные направления развития, происходит обновление экономических институтов [Perez, 2002]. Еще одно упрощение — синхронизированное описание создания инфраструктуры для новых технологий и реализации их потенциала. На практике бурный рост новых отраслей начинается после появления необходимой инфраструктуры. Так, бум в автомобилестроении США возник после строительства сети дорог.

Хотя в предложенной модели привязка смены этапов к динамике фондоотдачи придает этой смене эндогенный характер, модель остается не вполне замкнутой. Причина этого — экзогенное появление в модели новых технологий. Для преодоления такого недостатка необходимо включение в модель механизма ресурсного обеспечения исследований и разработок.

Весьма важным является финансовый аспект длинноволновой динамики, не получивший раскрытия в изложенной модели. В периоды быстрого роста результатов производства используемые активы часто получают настолько завышенную финансовую оценку, что возникают финансовые пузыри. Спад производства провоцирует недооценку активов. Поскольку новые технологии способны как поддерживать, так и вытеснять производства уходящей длинной волны, последствия такого влияния позволяют говорить о финансовом аспекте интерференции длинных волн экономического развития. Этот аспект их интерференции требует специальных исследований.

## Список литературы (References)

- Акаев А. А., Рудской А. И.* Об одной математической модели для прогнозных расчетов синергетического эффекта NBIC-технологий и оценки его влияния на экономический рост в первой половине XXI века // Доклады Академии наук. — 2015. — Т. 461, № 4. — С. 383–386. — DOI: 10.7868/S0869565215100047
- Akaev A. A., Rudskoj A. I.* Ob odnoj matematicheskoj modeli dlya prognoznyh raschetov sinergeticheskogo effekta NBIC-tehnologij i ocenki ego vliyaniya na ekonomicheskij rost v pervoj polovine XXI veka [On a mathematical model for predictive calculations of the synergetic effect of NBIC technologies and assessment of its impact on economic growth in the first half of the XXI century] // Doklady Akademii nauk [Doklady Mathematics]. — 2015. — Vol. 461, No. 4. — P. 383–386 (in Russian).
- Акаев А. А., Садовничий В. А.* Замкнутая динамическая модель для описания и расчета длинной волны экономического развития Кондратьева // Вестник Российской академии наук. — 2016. — Т. 86, № 10. — С. 883–896. — DOI: 10.7868/S0869587316100029
- Akaev A. A., Sadovnichij V. A.* Zamknutaya dinamicheskaya model' dlya opisaniya i rascheta dlinnoj volny ekonomicheskogo razvitiya Kondrat'eva [Closed-loop dynamic model for describing and calculating the long wave of economic development Kondratyev] // Vestnik Rossijskoj akademii nauk [Herald of the Russian Academy of Sciences]. — 2016. — Vol. 86, No. 10. — P. 883–896 (in Russian).
- Акаев А. А., Хироока М.* Об одной математической модели для долгосрочного прогнозирования динамики инновационно-экономического развития // Доклады Академии наук. — 2009. — Т. 425, № 6. — С. 727–732.

- Akaev A. A., Hirooka M.* Ob odnoj matematicheskoj modeli dlya dolgosrochnogo prognozirovaniya dinamiki innovacionno-ekonomicheskogo razvitiya [On one mathematical model for long-term forecasting of the dynamics of innovation and economic development] // *Doklady Akademii nauk [Doklady Mathematics]*. — 2009. — Vol. 425, No. 6. — P. 727–732 (in Russian).
- Глазьев С. Ю.* Теория долгосрочного технико-экономического развития. — М.: ВладДар, 1993.  
*Glaz'ev S. Yu.* Teoriya dolgosrochnogo tekhniko-ekonomicheskogo razvitiya [The theory of long-term technical and economic development]. — Moscow: VlaDar, 1993 (in Russian).
- Дубовский С. В.* Объект моделирования — цикл Кондратьева // *Матем. Моделирование*. — 1995. — Т. 7, № 6. — С. 65–74.  
*Dubovskij S. V.* Ob'ekt modelirovaniya — cikl Kondrat'eva [Modeling object — Kondratieff cycle] // *Matem. Modelirovanie [Mathematical Models and Computer Simulations]*. — 1995. — Vol. 7, No. 6. — P. 65–74 (in Russian).
- Кирилюк И. Л.* Дискретная форма уравнений в теории переключающегося воспроизводства с различными вариантами финансовых потоков // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2016. — Т. 8, № 5. — С. 803–815. — DOI: 10.20537/2076-7633-2016-8-5-803-815  
*Kirilyuk I. L.* Diskretnaya forma uravnenij v teorii pereklyuchayushchegosya vosproizvodstva s razlichnymi variantami finansovyh potokov [The discrete form of the equations in the theory of the shifting mode of reproduction with different variants of financial flows] // *Computer Research and Modeling*. — 2016. — Vol. 8, No. 5. — P. 803–815 (in Russian).
- Кондратьев Н. Д.* Большие циклы конъюнктуры / Избр. соч. — М.: Экономика, 1993.  
*Kondrat'ev N. D.* Bol'shie cikly kon'yunktury [Large business cycles] / *Izbr. soch.* — Moscow: Ekonomika, 1993 (in Russian).
- Кузнецов Ю. А., Маркова С. Е.* Математическое моделирование динамики смены поколений инновационных технологий // *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Сер. Социальные науки*. — 2017. — Т. 45, № 1. — С. 37–45.  
*Kuznezov Yu. A., Markova S. E.* Matematicheskoe modelirovanie dinamiki smeny pokolenij innovacionny'kh tekhnologij [Mathematical models for the dynamics of innovation technology generation change] // *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Ser. Sotsial'nye nauki [Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Series: Social Sciences]*. — 2017. — Vol. 45, No. 1. — P. 37–45 (in Russian).
- Маевский В. И., Малков С. Ю., Рубинштейн А. А.* Анализ связи между эмиссией, инфляцией и экономическим ростом с помощью модели переключающегося режима воспроизводства // *Вопросы экономики*. — 2019. — № 8. — С. 45–66. — DOI: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2019-8-45-66>  
*Mayevsky V. I., Malkov S. Yu., Rubinstein A. A.* Analiz svyazi mezhdru emissiyey, inflyatsiyey i ekonomicheskim rostom s pomoshch'yu modeli pereklyuchayushchegosya rezhima vosproizvodstva [Analysis of the relationship between issuing money, inflation and economic growth with the help of the SMR-model] // *Voprosy Ekonomiki*. — 2019. — No. 8. — P. 45–66 (in Russian).
- Меньшиков С. М., Клименко Л. А.* Длинные волны в экономике: когда общество меняет кожу. — М.: Международные отношения, 1989.  
*Men'shikov S. M., Klimenko L. A.* Dlinnye volny v ekonomike: kogda obshchestvo menyaet kozhu [Long waves in the economy: when society changes skin]. — Moscow: Mezhdunarodnye otnosheniya, 1989 (in Russian).
- Полтерович В.* Гипотеза об инновационной паузе и стратегия модернизации // *Вопросы экономики*. — 2009. — № 6. — С. 4–23. — DOI: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2009-6-4-23>  
*Polterovich V.* Gipoteza ob innovacionnoj pauze i strategiya modernizacii [The innovation pause hypothesis and modernization strategy] // *Voprosy Ekonomiki*. — 2009. — No. 6. — P. 4–23 (in Russian).
- Полтерович В. М.* Теория эндогенного экономического роста и уравнения математической физики // *Журнал Новой экономической ассоциации*. — 2017. — Т. 34, № 2. — С. 193–201.  
*Polterovich V. M.* Teoriya endogenного ekonomicheskogo rosta i uravneniya matematicheskoj fiziki [The Theory of Endogenous Economic Growth and Equations of Mathematical Physics] // *Zhurnal Novoj ekonomicheskoy associacii [The Journal of the New Economic Association]*. — 2017. — Vol. 34, No. 2. — P. 193–201 (in Russian).
- Полтерович В. М., Хенкин Г. М.* Эволюционная модель взаимодействия процессов создания и заимствования технологий // *Экономика и математические методы*. — 1988. — Т. 24, № 6. — С. 1071–1083.  
*Polterovich V. M., Khenkin G. M.* Evolyucionnaya model' vzaimodejstviya processsov sozdaniya i zaimstvovaniya tekhnologij [An Evolutionary Model with Interaction between Development and Adoption of New Technologies] // *Ekonomika i matematicheskie metody [Economics and Mathematical Methods]*. — 1988. — Vol. 24, No. 6. — P. 1071–1083 (in Russian).

- Румянцева С. Ю.* Теория длинных волн экономического развития: актуальные тенденции и междисциплинарные связи // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 5. Экономика. — 2005. — Вып. 3. — С. 31–41.  
*Rumyantseva S. Yu.* Teoriya dlennykh voln ekonomicheskogo razvitiya: aktual'nye tendencii i mezhdisciplinarnye svyazi [The Theory of Long Wave of Economic Development: Contemporary Tendencies and Interdisciplinary Relations] // Vestn. St.-Peterb. un-ta. Ser. 5. Ekonomika [St. Petersburg University Journal of Economic Studies]. — 2005. — No. 3. — P. 31–41 (in Russian).
- Чернавский Д. С., Старков Н. И., Малков С. Ю., Косе Ю. В., Щербаков А. В.* Об эконофизике и ее месте в современной теоретической экономике // Успехи физических наук. — 2011. — Т. 181, № 7. — С. 767–773. — DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0181.201107i.0767>  
*Chernavskij D. S., Starkov N. I., Malkov S. Yu., Kose Yu. V., Shherbakov A. V.* Ob ekonofizike i eyo meste v sovremennoj teoreticheskoj ekonomike [About provided and its place in modern theoretical Economics] // Uspekhi fizicheskikh nauk [Physics-Uspekh]. — 2011. — Vol. 181, No. 7. — P. 767–773 (in Russian).
- Хенкин Г. М., Шананин А. А.* Математическое моделирование шumpетеровской инновационной динамики // Математическое моделирование. — 2014. — Т. 26, № 8. — С. 3–19.  
*Khenkin G. M., Shaninin A. A.* Matematicheskoe modelirovanie shumpeterovskoj innovacionnoj dinamiki [Mathematical Modeling of the Schumpeterian Dynamics of Innovation] // Matematicheskoe modelirovanie [Mathematical Modeling]. — 2014. — Vol. 26, No. 8. — P. 3–19 (in Russian).
- Acemoglu D., Cao D.* Innovation by Entrants and Incumbents // Journal of Economic Theory. — 2015. — Vol. 157. — P. 255–294.
- Aghion P., Howitt P.* Endogenous Growth Theory. — Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- Arrow K.* The Economic Implications of Learning by Doing // The Review of Economic Studies. — 1962. — Vol. 29. — P. 155–123.
- Boucekkine R., De la Croix D., Licandro O.* Vintage Capital Growth Theory: Three Breakthroughs // Barcelona GSE Working Paper. — 2011. — Vol. 565.
- Diamond P.* National Debt in a Neoclassical Growth Model // American Economic Review. — 1965. — Vol. 55, No. 5. — P. 1126–1150.
- Grinin L., Korotayev A., Grinin A.* A quantitative analysis of worldwide long-term technology growth: From 40,000 BCE to the early 22nd century // Technological Forecasting and Social Change. — 2020. — Vol. 155, June 2020. — P. 119955. — DOI: 10.1016/j.techfore.2020.119955
- Helpman E., Trajtenberg M.* A Time to Sow and a Time to Reap: Growth Based on General Purpose Technologies / Helpman Elhanan (ed.). General Purpose Technologies and Economic Growth. — Cambridge, MA: MIT Press, 1998. — P. 55–83.
- Hirooka M.* Innovation Dynamism and Economic Growth. A Nonlinear Perspective. — Cheltenham, UK — Northampton, MA: Edward Elgar, 2006.
- Mensch G.* Stalemate in Technology: Innovations Overcome the Depression. — New York: Ballinger Publishing Company, 1979.
- Perez C.* Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of bubbles and Golden Ages. — Cheltenham: Elgar, 2002.

