

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Программа фундаментальных исследований Президиума РАН  
«Экономика и социология науки и образования»

Направление «Математическое моделирование глобальной  
и региональной динамики в условиях модернизации систем науки и образования»

Институт востоковедения

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. Ломоносова

---

# МИРОВАЯ ДИНАМИКА

## *Закономерности, тенденции, перспективы*

Ответственные редакторы  
иностраный член Российской академии наук,  
доктор технических наук, профессор *А. А. Акаев*,  
доктор исторических наук, профессор *А. В. Коротков*,  
доктор технических наук, профессор *С. Ю. Малков*



URSS

МОСКВА

**Мировая динамика: Закономерности, тенденции, перспективы** / Отв. ред. А. А. Акаев, А. В. Коротаяев, С. Ю. Малков. — М.: КРАСАНД, 2014. — 488 с.

Книга содержит результаты исследований, посвященных анализу, математическому моделированию и прогнозу мировой динамики. В условиях крайней нестабильности в современном мире такие исследования являются чрезвычайно актуальными. Авторами исследуются проблемы социально-экономического, демографического, технологического, политического развития мира, его основных регионов, в том числе России. Рассматривается самый широкий круг вопросов — от закономерностей эволюции глобальной банковской системы до геополитического моделирования. Делается попытка прояснить и развить некоторые важные аспекты теории длинных циклов, или кондратьевских волн. Исследования проводились в рамках проекта «Математическое моделирование глобальной и региональной динамики в условиях модернизации систем науки и образования» (руководитель — действительный член РАН, ректор МГУ В. А. Садовничий) Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экономика и социология науки и образования», в рамках которой был осуществлен успешный прогноз начала второй волны глобального кризиса в августе 2011 г.

Представленные в книге прогнозы относятся к ключевым сферам жизнедеятельности — экономике, финансам, политике, демографии, управлению рисками. Книга предназначена исследователям, экспертам, руководителям, а также широким слоям читательской аудитории, интересующимся перспективами развития мира и России.

Издательство «КРАСАНД», 117335, Москва, Нахимовский пр-т, 56.  
 Формат 60×90/16. Печ. л. 30,5. Зак. № 311-08.  
 Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».  
 117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-396-00560-0

© КРАСАНД, 2013

13483 ID 168360



НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

E-mail: URSS@URSS.ru

Каталог изданий в Интернете:  
<http://URSS.ru>

Тел./факс (многоканальный):  
 +7 (499) 724 25 45

URSS

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

## Оглавление

|  |  |
|--|--|
| <b>Введение</b> . . . . .  | <b>7</b>   |
| <b>I АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА</b>               |  |
| <b>Глава 1</b> А. А. Акаев,<br>В. А. Садовничий,<br>И. Е. Ануфриев | Усовершенствованная НИОКР-<br>модель для прогнозных расчетов<br>совокупной производительности<br>факторов экономического роста . . . . . <b>15</b> |
| <b>Глава 2</b> В. И. Маевский,<br>С. Ю. Малков                     | Экономический рост:<br>проблемы анализа и<br>моделирования . . . . . <b>51</b>   |
| <b>Глава 3</b> В. Н. Покровский                                    | Технический прогресс<br>в теории экономического роста . . . . . <b>80</b>  |
| <b>Глава 4</b> Л. Г. Бадалаян,<br>В. Ф. Криворотов                 | Модель роста:<br>взаимодействие среды и системы.<br>Деньги и реальная экономика . . . . . <b>98</b>  |

## Глава 3

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС В ТЕОРИИ  
ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА

В. Н. Покровский

В течение столетий исследователи экономических процессов стремились установить первоисточник богатства, то есть свести стоимость произведенных продуктов (в масштабах нации эта величина называется валовым национальным продуктом) к некоторым универсальным производственным факторам, в число которых прочно вошли усилия людей по производству продуктов  $L$  (трудозатраты) и производственное оборудование или основные производственные фонды, что универсально оценивается их стоимостью  $K$  (основной капитал) (Blaug 1997). При разработке теории выяснилось, что использование двух факторов (трудозатраты и основной капитал) не описывает экономический рост адекватно: анализ эмпирических данных продемонстрировал необходимость введения в теорию характеристик технического прогресса, который, как было показано (Grossman, Helpman 1994), является движущей силой современного развития, однако, судя по фундаментальным обзорам (Aghion, Howitt 1998, 2009), учет технического прогресса в теории экономического роста до сих пор оказывается обсуждаемой проблемой, не имеющей окончательного решения. Чтобы пояснить ситуацию подробнее, проследим основные этапы развития теории.

Неоклассический подход основывается на представлении о производительной силе капитала и полагает, что выпуск  $Y$  можно рассматривать как функцию двух производственных факторов: трудозатрат ( $L$ ) и капитала ( $K$ )

$$Y = Y(K, L). \quad (1)$$

Это соотношение формализовало представление неоклассической теории о замещении труда капиталом. Для интерпретации эмпирических данных были предложены различные формы производственной функции (Brown 1966; Ferguson 1969), но исследователи часто используют простое представление – производственную функцию Кобба–Дугласа (Cobb, Douglas 1928)

$$Y = Y_0 \frac{L}{L_0} \left( \frac{L_0 K}{L K_0} \right)^\alpha, \quad 0 < \alpha < 1, \quad (2)$$

где индекс  $\alpha$  следует рассматривать как характеристику системы производства непосредственно.

В рамках неоклассического подхода было также предположено (Harrod 1939, 1948; Domar 1946, 1947), что капитал и трудозатраты связаны друг с другом, так что выпуск может быть представлен как линейная функция капитала (или обобщенного капитала)

$$Y = A K, \quad (3)$$

где производительность «капитала» ( $A$ ), по эмпирическим свидетельствам, например, для США, не зависит от факторов производства.

Следующий важный шаг к пониманию экономического роста был сделан в середине прошлого столетия в работах Солоу (Solow 1957) и других исследователей. Чтобы ввести в теорию технологический прогресс, который, как было продемонстрировано, в конечном счете является источником экономического роста в развитых странах в последние столетия, было предложено не понимать аргументы функции (1) буквально, как капитал и трудозатраты, а полагать, что они представляют услуги, оказываемые капиталом и трудом, так что следует записать

$$Y = (K', L'). \quad (4)$$

Величины  $K' = A_K(t)K$  и  $L' = A_L(t)L$  являются услугами, предоставляемыми измеряемыми количествами основного капитала  $K$  и труда  $L$ , но несколько отличаются от них. Другими словами, вводится дополнительная временная зависимость функции (1), и эта зависимость, полагают, связана с техническим прогрессом. Использование понятий услуг труда и капитала, как оказалось, было необходимым и решало проблему описания наблюдаемого роста выпуска (Griliches 1979, 1988; Jorgenson, Griliches 1967; Jorgenson и Stiroh, 2000) с помощью двух факторов производства и некоторой эмпирической величины, названной фактором суммарной производительности (*total factor productivity*) или остатком Солоу. Фактически, эта интерпретация неявно включает некоторые неизвестные производственные факторы, которые оказались объектами изучения в недавние десятилетия (Aghion, Howitt 1998, 2009).

Однако выполненные исследования не привели к окончательному решению проблемы эндогенного включения технического прогресса в теорию. Далее мы не будем следовать главному направлению развития теории экономического роста, которое может быть прослежено в книгах (Aghion, Howitt 1998, 2009), но, взамен, обратимся к боковой ветви теории (Beaudreau 1998, 2005b; Ayres et al. 2003) и исследуем простую гипотезу.

### 1. Трехфакторная производственная функция

Отправляясь от формулы (4), предположим, что услугу капитала  $K' = A_K(t)K$ , для которой введем символ  $P$ , можно рассматривать как независимую переменную, тогда как услуга труда идентифицируется с трудозатратами,  $L' = L$ , что представляет некоторую эталонную ссылку. Тогда, принимая также основной капитал ( $K$ ) во внимание, производство стоимости следует рассматривать как функции трех производственных факторов

$$Y = Y(K, L, P). \quad (5)$$

Эту формулу можно сравнить с формулой (1), при этом переход от (1) к (5) может быть интерпретирован следующим образом: в формуле (1) переменная  $K$  играет две различных роли: основной капитал как мера наличия оборудования производства и услуга капитала как замещение трудозатрат. При написании формулы (5) две роли переменной  $K$  представлены двумя переменными:  $K$  и  $P$ , причем основной капитал является средством привлечения труда и услуг капитала к производству.

По определению, работа людей замещается услугами капитала, так что трудозатраты и услуга капитала (но не капитал!) являются заместителями по отношению друг к другу. Указанное свойство производственных факторов позволяет нам определить производственную функцию для выпуска в виде две альтернативных линий

$$Y = \begin{cases} \xi K, & \xi > 0 \\ Y_0 \frac{L}{L_0} \left( \frac{L_0 P}{L P_0} \right)^\alpha, & 0 < \alpha < 1 \end{cases} \quad (6)$$

Взаимодополняющие описания производства стоимости обсуждались в прошлом. Первая линия в записанной выше формуле напоминает нам о подходе Хэррода и Домара, в то время как функция во второй линии имеет форму производственной функции Кобба–Дугласа, в которой услуга капитала стоит вместо основного капитала. Индекс  $\alpha$  и производительность основного капитала  $\xi$  являются внутренними характеристиками производственной системы.

Третий производственный фактор  $P$  введен формально, и, используя уравнение (6), можно, независимо от того, что такое услуга капитала, вычислить значение этой величины по временным рядам для выпуска ( $Y$ ), основного капитала ( $K$ ) и трудозатрат ( $L$ ), которые легко доступны на американских правительственных вебсайтах и были собраны, например, в приложении монографии (Pokrovskii 2011b). Разработанные методы позволяют оценить услуги капитала  $P$  и технологический индекс  $\alpha$ , при том, что значения всех остальных величин совпадают с эмпирическими (Pokrovskii 2003). Эмпирические и вычисленные зависимости показаны

(рис. 1) наряду с суммарным первичным потреблением энергии ( $E$ ), которое является количеством (в энергетических единицах) энергетических носителей.

Рис. 1. Согласованное описание экономического роста США

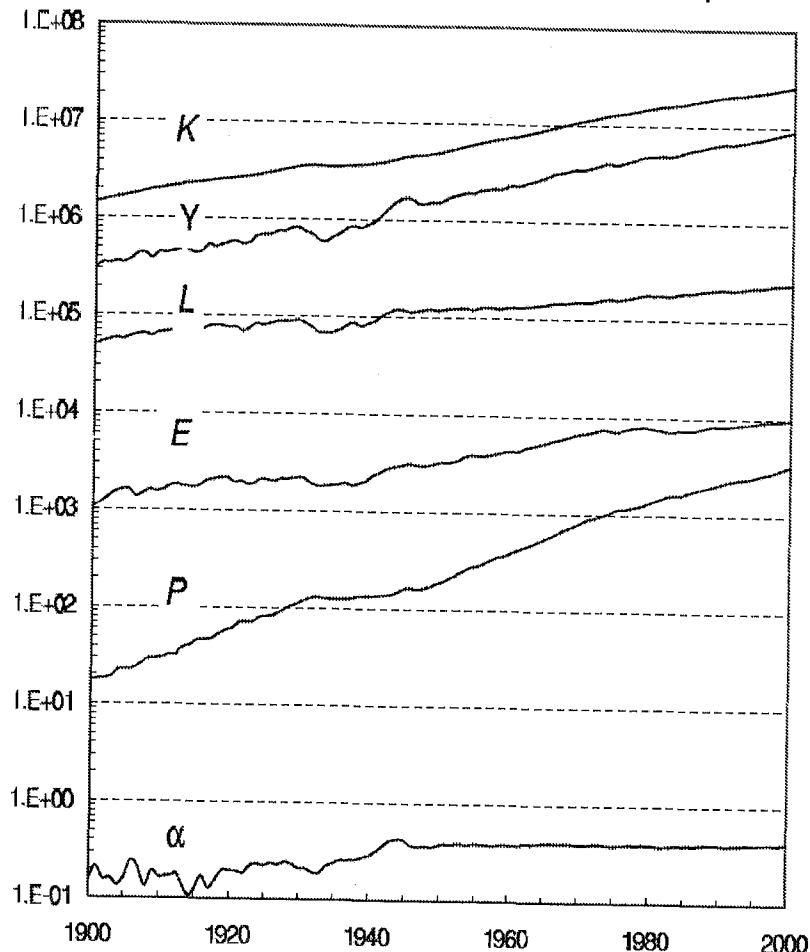


Рисунок показывает эмпирические оценки производства стоимости (ВВП)  $Y$  в миллионах долл. 1996 г. за год; наличие оборудования производства (основной капитал)  $K$  в миллионах долл. 1996 г.; трудозатраты  $L$  в миллионах рабочих часов за год и суммарное потребление первичных энергоносителей  $E$  в  $10^{16}$  джоулей за год. Также представлены вычислен-

ные величины: работа замещения (производительного потребления энергии)  $P$  в  $10^{16}$  джоулей за год и технологический индекс  $\alpha$ , которые соответствуют заданным значениям  $Y$ ,  $K$  и  $L$ .

Следует отметить, что теория не имеет никаких произвольных параметров: услуги капитала  $P$  и технологический индекс  $\alpha$  являются переменными, которые могут быть оценены другими способами. Технологический индекс представляет долю расходов, необходимых для использования услуг капитала в суммарных расходах на содержание факторов производства и может быть найден по оценкам стоимости потребления производственных факторов. Различные оценки технологического индекса сопоставимы (Pokrovskii 2003). Технологический индекс  $\alpha$  меняется медленно и его можно считать постоянным в течение десятилетий; существенные изменения технологического индекса запускаются чрезвычайными событиями, подобными Второй Мировой войне в 1940–45 гг.

Таким образом, можно достигнуть последовательного описания роста экономики США при формальном рассмотрении услуги капитала как независимой переменной. Однако все же интересно понять, каков смысл этой величины?

## 2. Что такое услуга капитала?

Основным свойством услуги капитала является ее способность замещать усилия людей в производстве, при этом усилия людей замещаются работой сторонних энергетических источников посредством различных сложных приспособлений, и потому услугу капитала можно сопоставить с работой производственного оборудования. Труд людей может быть замещен только работой (не оборудованием!), и величину следует считать мерой этой работы. Для иллюстрации ниже перечислены некоторые процессы замещения.

1. *Усилия по перемещению веществ и тел (включая тела людей)* в прежние времена замещала работа животных, ветра и мобильных паровых двигателей. Теперь эти усилия замещаются главным образом работой самоходных машин – автомобилей, грузовиков, самолетов и другими мобильными приспособлениями.

2. *Усилия по преобразованию и разделению веществ и тел* являются усилиями при производстве одежды, инструментов, различных приборов и тому подобному – многих, если не всех, продуктов промышленности. Животные, ветер, вода и пар использовались для того, чтобы выполнять работу вместо людей в предыдущих столетиях. К середине двадцатого столетия та же самая работа делается, главным образом, машинами с электроприводом.

3. *Усилия по контролю деятельности, развитие принципов организации* до недавнего времени рассматривались как существенно человеческие

функции. В то время как упомянутые в пунктах 1 и 2 усилия людей успешно замещались работой сторонних источников энергии с древнейших времен, попытки механизировать функции мозга были главным образом неудачны до появления компьютеров (информационных процессоров) в двадцатом столетии. Теперь работу мозга замещают информационные процессоры, которые питаются электричеством.

Следует различать первичную и истинную работу производственного оборудования, методы оценки которых еще только разрабатываются (Ayres *et al.* 2003; Pokrovskii 2007). Первичная работа замещения  $E_p$  может быть оценена непосредственно как работа оборудования производства, которое выполняет те же самые операции как работающие, но с помощью внешних источников энергии. Истинная работа производственного оборудования представляет работу, которая непосредственно замещает усилия людей, и является производственным фактором  $P$ . Было показано (Pokrovskii 2007), что расчетные величины услуг капитала, которые необходимы, чтобы получить правильные значения выпуска, соответствуют значениям истинной работы производственного оборудования, оцененными непосредственно (Ayres *et al.* 2003).

В теории производства энергетические носители рассматриваются как промежуточные продукты, которые исчезают при производстве, добавляя свою стоимость к цене, подобно любому другому промежуточному продукту, участвующему в процессе производства. Однако ту часть энергии, преобразованной для того, чтобы выполнить работу с помощью производственного оборудования, следует рассматривать также как создающий стоимость фактор. Определенную таким образом работу замещения, следует рассматривать наравне с производственными факторами традиционной неоклассической теории: капиталом ( $K$ ) и трудозатратами ( $L$ ). Работу замещения, как фактор производства, следует также рассматривать как услугу капитала, предоставляемую основным капиталом.

Следует отметить, что наблюдаемое возрастание работы замещения во времени связано с возрастанием другого универсального фактора, которым является совокупность накопленных знаний (архив знаний). Действительно, чтобы использовать стороннюю энергию в производстве, нужно иметь доступные источники энергии и приспособления для использования энергии в целях производства. Определенные устройства должны быть изобретены, изготовлены и установлены для работы. Таким образом, предложение работы замещения определено фундаментальными результатами науки, исследованиями, проектными работами и материализацией всего человеческого воображения о том, как использовать энергию для производства. Возможность привлечения дополнительной энергии к производству основана на запасе знаний, то есть, на массе отложенных, архивированных сообщений, которые оказываются бесполезными, если они не реализованы в рутинных процессах производства. Можно найти

большое количество блестящих примеров «преобразования» знания в полезную энергию в истории технологии. Однако немного известно о формальном описании этого процесса, так что можно только догадываться, что предложение работы замещения, то есть, энергии, которая может быть использована обществом, определено доступным знанием, причем работу замещения можно рассматривать как меру используемого знания. Можно думать, что текущее внимание к архиву знаний, как фактору производства и подлинному источнику экономического роста (Aghion, Howitt 1998, 2009), может помочь решить проблему.

Далее мы примем во внимание, что третий производственный фактор имеет значение работы замещения, что позволяет нам включить особенности технологии в описание для того, чтобы рассматривать экономический рост с учетом технологических достижений.

### 3. Динамика факторов производства

С материальной точки зрения, процесс производства представляет процесс преобразования сырых материалов и полуфабрикатов в законченные и незаконченные изделия. Используемая технология определяет, прежде всего, что следует производить, и определяет материальную сторону процесса производства. Различные приспособления, которые являются материальной реализацией технологии, были изобретены, чтобы выполнять преобразование. Собрание различного оборудования оценивается его стоимостью (основной капитал), которая подчиняется стандартному (Blanchard, Fisher 1989) балансовому соотношению

$$\frac{dK}{dt} = I - \mu K, \quad (7)$$

где производственные инвестиции ( $I$ ) являются частью выпуска ( $Y$ ), которая сохранена в материальной форме производственного оборудования, в то время как другая часть выпуска предназначена для потребления и непроизводственного накопления. Последнее слагаемое в правой части равенства (7) описывает уменьшение основного капитала с коэффициентом выбытия  $\mu$  из-за изнашивания производственного оборудования.

С другой стороны, необходима работа, чтобы произвести какой-нибудь продукт. Работа может быть совершена рабочим, или же производственным оборудованием с помощью некоторых сторонних энергетических источников (ветер, вода, уголь, нефть и др.), которые могут использоваться, чтобы выполнить ту же самую работу. Технология определяет, величины трудозатрат ( $L$ ) и работы замещения ( $P$ ) необходимые для производства. Распирение производства, характеризующееся изменениями накопленной стоимости  $K$ , требует дополнительных трудозатрат и ра-

боты замещения, так что динамика факторов производства может быть записана как пара балансовых уравнений

$$\frac{dL}{dt} = \lambda I - (\nu' + \mu)L, \quad \frac{dP}{dt} = \varepsilon I - (\eta' + \mu)P. \quad (8)$$

Первые слагаемые в правой части этих соотношений описывают увеличение в потреблении факторов производства, вызванных инвестициями  $I$ , которые, как полагают, являются действительными двигателями развития производства. Величины  $\lambda$  и  $\varepsilon$  введены, как обобщенные характеристики производственного оборудования, чтобы обозначить требуемое количество трудозатрат и работы замещения, необходимые для установления единицы (по стоимости) оборудования. Вторые слагаемые в правой части уравнений (8) представляют уменьшение факторов производства вследствие изнашивания и удаления части оборудования производства. Уменьшение величины оборудования производства (основной капитал) охарактеризовано коэффициентом амортизации  $\mu$  (уравнение 7). Величины  $\mu + \nu'$  и  $\mu + \eta'$  являются эффективными коэффициентами выбытия трудозатрат и работы замещения. Если установленное технологическое оборудование не меняет своего качества в течение времени (что будет принято для простоты в последующих разделах), величины  $\nu' = 0$  и  $\eta' = 0$ , и все коэффициенты выбытия в уравнениях (7) и (8) оказываются одинаковыми. Следует отметить, что уравнения баланса (8) для факторов производства являются, фактически, определениями технологических характеристик основного капитала и не вовлекают никаких предположений.

Наряду с трудовыми и энергетическими требованиями,  $\lambda$  и  $\varepsilon$ , удобно использовать безразмерные характеристики основного капитала, обозначенные чертой наверху символа, и технологический индекс  $\alpha$

$$\bar{\lambda} = \frac{K}{L} \lambda, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{K}{P} \varepsilon, \quad \alpha = \frac{1 - \bar{\lambda}}{\bar{\varepsilon} - \bar{\lambda}}. \quad (9)$$

Величина  $\alpha$  оказывается очень важной характеристикой производственной системы; показано (Pokrovskii 2003), что этот индекс является тем же самым индексом, который присутствует в формуле (6). Принцип производительности ограничивает значения технологического индекса,  $0 < \alpha < 1$ . Кроме того, вся доступная информация о технологических процессах может быть введена при оценивании этой величины. Более того, условие оптимального использования факторов производства позволяет нам установить соотношение между индексом с одной стороны и затратами факторов производства с другой (Pokrovskii 2003). Это обеспечивает различные средства оценивания технологического индекса.

#### 4. Три моды развития

Инвестиции в производство могут быть определены при рассмотрении динамики производственных факторов. В любом случае, темпы реального роста производственных факторов не превышают темпов потенциального роста, заданных как функции времени

$$\tilde{\delta}(t) \geq \delta = \frac{1}{K} \frac{dK}{dt}, \quad \tilde{\nu}(t) \geq \nu = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt}, \quad \tilde{\eta}(t) \geq \eta = \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \quad (10)$$

Эти соотношения при учете уравнений (7) и (8) определяют ограничения на инвестиции в производственный сектор

$$I \leq (\mu + \tilde{\delta})K, \quad I \leq \frac{\mu + \tilde{\nu}}{\lambda}L, \quad I \leq \frac{\mu + \tilde{\eta}}{\varepsilon}P. \quad (11)$$

Реальные инвестиции определяются конкуренцией между потенциальными инвестициями. Можно предположить, что производственная система старается поглотить все доступные производственные факторы. В этом случае, следует написать для инвестиций

$$I = (\delta + \mu)K = \min \begin{cases} (\tilde{\delta} + \mu)K \\ (\tilde{\nu} + \mu)K/\lambda \\ (\tilde{\eta} + \mu)K/\varepsilon \end{cases}. \quad (12)$$

Согласно трем линиям этого соотношения, можно определить три моды экономического развития, для которых мы имеем различные формулы для темпов реального роста производственных факторов, которые могут быть найдены по уравнениям (7), (8) и (12) для трех мод в виде

$$\begin{aligned} \delta = \tilde{\delta}, \quad \nu = (\tilde{\delta} + \mu)\bar{\lambda} - \mu, \quad \eta = (\tilde{\delta} + \mu)\bar{\varepsilon} - \mu, \\ \delta = (\tilde{\nu} + \mu)\frac{1}{\lambda} - \mu, \quad \nu = \tilde{\nu}, \quad \eta = (\tilde{\nu} + \mu)\frac{\bar{\varepsilon}}{\lambda} - \mu, \\ \delta = (\tilde{\eta} + \mu)\frac{1}{\varepsilon} - \mu, \quad \nu = (\tilde{\eta} + \mu)\frac{\bar{\lambda}}{\varepsilon} - \mu, \quad \eta = \tilde{\eta}. \end{aligned} \quad (13)$$

Набор уравнений в верхней строке справедлив для случая недостатка инвестиций, избытка труда, энергии и сырья. Вторая строка справедлива для случая недостатка труда, избытка инвестиций, энергии и сырья. Последняя строка уравнений справедлива для случая нехватки энергии, избытка инвестиций, труда и сырья. Изменение мод развития приводит к тому, что темпы фактического роста факторов производства оказываются меньшими, чем заданные темпы потенциального роста.

Для того чтобы выяснить закон изменения технологических коэффициентов, следует предположить, что существуют внутренние изменения, которые приводят к изменениям технологических коэффициентов, тогда как производственная система стремится использовать все доступные ресурсы. Предполагая, что технологические коэффициенты имеют тенденции изменяться таким способом, что неравенства в условиях (11) меняются так, чтобы превратиться в равенства, в первом приближении, можно написать (Pokrovskii 1999, 2011b) уравнения для технологических коэффициентов

$$\frac{d\bar{\lambda}}{dt} = -\frac{1}{\tau} \left( \bar{\lambda} - \frac{\tilde{\nu} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu} \right), \quad (14)$$

$$\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} = -\frac{1}{\tau} \left( \bar{\varepsilon} - \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu} \right), \quad (15)$$

где  $\tau$  является временем перехода от одной технологической ситуации к другой, когда внешние параметры  $\tilde{\nu}$  and  $\tilde{\eta}$  меняются. Переход определен внутренними процессами и связан с распространением известных технологий и с созданием новых.

Заметим, что теперь можно сформулировать признаки каждой из трех мод в терминах временной зависимости технологических коэффициентов

$$\frac{d\bar{\lambda}}{dt} > 0, \quad \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} > 0, \quad (16)$$

$$\frac{d\bar{\lambda}}{dt} < 0, \quad \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} > 0, \quad (17)$$

$$\frac{d\bar{\lambda}}{dt} > 0, \quad \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} < 0. \quad (18)$$

Верхняя строка справедлива для случая недостатка инвестиций, избытка труда, энергии и сырья. Вторая строка справедлива для случая недостатка труда, избытка инвестиций, энергии и сырья. Последняя строка уравнений справедлива для случая нехватки энергии, избытка инвестиций, труда и сырья.

## 5. Особенности динамики производства

В этом разделе будет рассмотрена применимость теории к реальности на примере экономики Соединенных Штатов в прошлом столетии, но, прежде всего, мы собираем уравнения, которые позволяют вычислять траектории развития системы производства.

### 5.1. Система эволюционных уравнений

Мы обращаемся к уравнениям (6) – (8), (12), (14) и (15), чтобы записать в самом простом приближении систему

$$Y = \begin{cases} \xi K, & \xi > 0 \\ Y_0 \frac{L}{L_0} \left( \frac{L_0 P}{L P_0} \right)^\alpha, & 0 < \alpha < 1 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{dK}{dt} &= I - \mu K, & \frac{dL}{dt} &= \left( \bar{\lambda} \frac{I}{K} - \mu \right) L, & \frac{dP}{dt} &= \left( \bar{\varepsilon} \frac{I}{K} - \mu \right) P, \\ \frac{I}{K} &= \min \left\{ (\bar{\delta} + \mu), (\bar{\nu} + \mu) \frac{1}{\bar{\lambda}}, (\bar{\eta} + \mu) \frac{1}{\bar{\varepsilon}} \right\}, \\ \frac{d\bar{\lambda}}{dt} &= -\frac{1}{\tau} \left( \bar{\lambda} - \frac{\bar{\nu} + \mu}{\bar{\delta} + \mu} \right), & \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} &= -\frac{1}{\tau} \left( \bar{\varepsilon} - \frac{\bar{\eta} + \mu}{\bar{\delta} + \mu} \right), & \alpha &= \frac{1 - \bar{\lambda}}{\bar{\varepsilon} - \bar{\lambda}} \end{aligned}$$

Система содержит восемь переменных  $K, L, P, I, \bar{\lambda}, \bar{\varepsilon}, \xi$  и  $\alpha$ , но только пять из них независимы. Предполагается, что следует задать начальные значения пяти независимых переменных, так же как темпы потенциального роста факторов производства

$$\bar{\delta} = \bar{\delta}(t), \quad \bar{\nu} = \bar{\nu}(t), \quad \bar{\eta} = \bar{\eta}(t),$$

и две характеристики системы: время перехода от одной технологической ситуации к другой  $\tau$  и коэффициент амортизации  $\mu$ . При этих условиях уравнения (19) позволяют анализировать развитие экономической системы в одноотраслевом приближении.

Система уравнений (19) устанавливает, что эволюция производственной системы определяется потенциальными темпами роста производственных факторов. Принцип, согласно которому развивается производство, может быть сформулирован как принцип максимального поглощения доступных ресурсов. Этот принцип развития является фактически энергетическим принципом развития, сформулированным Лотка (Lotka 1925): траектория развития системы определяется стремлением системы использовать наибольшее количество доступной энергии. Это поведение системы является следствием суммы усилий многих предпринимателей, стремящихся получить наибольшую прибыль. Реальная траектория развития системы производства определяется доступностью труда и энергии.

При этом остается ведущим принцип экономии живого труда: выигрывают те, кто заместил трудозатраты большей величиной работы машин. Однако закона экономии энергии не существует, по крайней мере, он остается в тени закона экономии живого труда. Энергию следует рассматривать как движущую силу производства; так или иначе, имеется сильная корреляция между выпуском продукции, с одной стороны, и производственным потреблением труда и энергии, с другой стороны.

### 5.2. Экспоненциальный рост

На графиках (Рис. 1) можно видеть, что временные зависимости производственных факторов  $K, L$  и  $P$  в течение относительно спокойного периода 1950–2000 гг. оказываются приблизительно прямыми линиями, так что в течение этих лет, рост факторов производства может быть описан показательными функциями

$$K = K_0 e^{\delta t}, \quad L = L_0 e^{\nu t}, \quad P = P_0 e^{\eta t} \quad (20)$$

с темпами роста (в единицах год<sup>-1</sup>)  $\delta = 0,0316, \nu = 0,0147, \eta = 0,0585$ .

При этом выпуск также изображается (Рис. 1) прямой линией, причем линии логарифма  $Y$  и  $K$  почти параллельны, из чего следует, что темп роста ВВП приблизительно совпадает с темпом роста основного капитала, что подтверждено многочисленными наблюдениями (Blanchard, Fisher 1989; Scott 1989). В течение 1950–2000 гг. эмпирический рост ВВП США можно аппроксимировать экспоненциальной функцией

$$Y = 1.69 \times 10^{12} \cdot e^{0.0326 t} \text{ dollar}(1996)/\text{year}.$$

Время  $t$  измерено в годах, в то время как  $t = 0$  соответствует 1950 г.

Показательные законы известны как «стилизованнные» факты экономического роста, и возникает некоторый интерес к тому, чтобы записать теоретические соотношения для этого случая.

Легко видеть, что в случае, когда все нормы потенциального роста заданы как постоянные

$$\delta = \bar{\delta}, \quad \nu = \bar{\nu}, \quad \eta = \bar{\eta},$$

уравнения (19) определяют асимптотическое решение (20) для производственных факторов, тогда как выражение для выпуска следует немедленно из первого из отношений (19) и может быть написано в следующей форме

$$Y = Y_0 e^{[\nu + \alpha(\eta - \nu)]t} = Y_0 e^{\delta t}. \quad (21)$$

Кроме того, из системы (19) следуют дополнительные соотношения



$$\frac{I}{K} = \delta + \mu, \quad \bar{\lambda} = \frac{\nu + \mu}{\delta + \mu}, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{\eta + \mu}{\delta + \mu}, \quad \alpha = \frac{\delta - \nu}{\eta - \nu}. \quad (22)$$

В соответствии с соотношением (21), средний темп роста выпуска 0,0326 приблизительно равен темпу роста основного капитала  $\delta = 0,0316$  и может быть также выражен через темпы роста трудозатрат и работы замещения. Разница между темпами роста капитала и выпуска оказывается весьма незначительной, учитывая грубую оценку параметров проблемы, тем не менее, при более детальном рассмотрении, расхождение может быть приписано внутрисекторным технологическим изменениям и различию темпов роста выпуска отдельных секторов (см.: Pokrovskii 2011b).

По известным темпам роста производственных факторов формулы (22) позволяют выполнить оценку технологических коэффициентов и технологического индекса. Можно считать темпы роста в период 1950–2000 гг. приблизительно постоянными и равными приведенным значениям, так что значение технологического индекса определяется как

$$\alpha = 0.39.$$

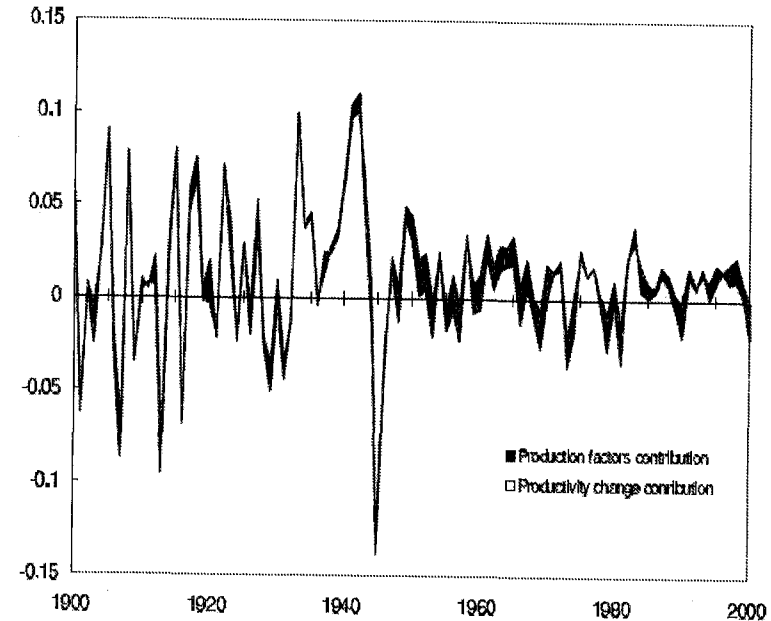
Эта оценка оказывается естественно близко к оценкам, полученным различными методами, что означает, что темпы реального роста производственных факторов можно рассматривать приблизительно постоянными в описанный период.

Можно видеть, что решение уравнений (19) в случае, когда темпы потенциального роста производственных факторов постоянны, соответствует «стилизованному» фактам экономического роста, описанного показательными функциями. Рассматриваемая теория объясняет факты экономического роста, особенно, главный факт недавнего развития, описываемый (Grossman, Helpman 1994) как: «расширение продукции опередило прирост населения за эти 200 лет начиная с промышленной революции». Технологическая теория экономического роста объясняет показательный рост ВВП, темп которого больше чем темп роста труда, и имеет средства, чтобы описать отклонения от среднего экспоненциального роста.

### 5.3. Разложение остатка Солоу

Выпуск в стандартной неоклассической теории с экзогенным техническим прогрессом определяется не только двумя производственными факторами, но и неопределенным, так называемым, фактором суммарной производительности или остатком Солоу. В рамках технологической теории экономического роста из остатка Солоу можно выделить часть, связанную с работой замещения, что было отмечено еще в работе Бодро (Beaudreau 2005a).

Рис. 2. Разложение остатка Солоу



Традиционный «фактор суммарной производительности» состоит из разницы между темпами роста работы замещения и основного капитала (черная область) и истинного остатка, связанного с непосредственными изменениями системы производства (технологические и структурные изменения).

Темп роста выпуска по уравнению (21) может быть разделен на две части, причем доля темпа роста  $(1 - \alpha) \nu \approx 0,0112$  связана с ростом трудозатрат, а другая часть  $\alpha \eta \approx 0,0235$  — с ростом работы замещения. Капитал является средством привлечения производственных факторов к действию, так что увеличение потребления производственных факторов связано с увеличением основного капитала. Можно формально выделить темп роста капитала  $\delta$  в темпе роста работы замещения  $\eta$ , чтобы получить разложение темпа роста выпуска в привычных для неоклассических экономистов терминах: вклад от роста трудозатрат  $(1 - \alpha) \nu \approx 0,0112$  и вклад от прироста капитала  $\alpha \delta \approx 0,0126$ . Можно видеть что остаток Солоу (фактор суммарной производительности) может быть выражен через технологический индекс и темпы роста как

$$\text{Solow Residual} = \alpha(\eta - \delta) = (1 - \alpha)(\delta - \nu) \approx 0.0109. \quad (23)$$

Структурные и технологические изменения, если существуют, компенсируют друг друга в этом простом случае показательного роста. Детальное

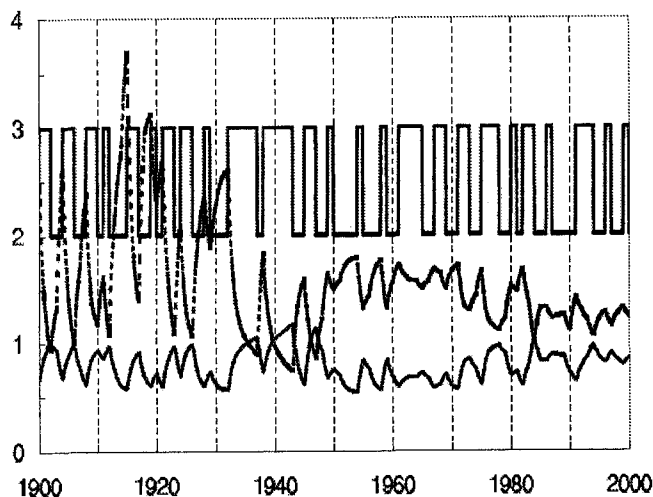
представление остатка Солоу (*Solow Residual*) для американской экономики показано на диаграмме (Рис. 2).

#### 5.4. Пульсирующий характер развития производства

В общем случае, система (19) описывает развитие системы производства, если темпы потенциального роста капитала, трудозатрат и работы замещения,  $\delta$ ,  $\nu$  и  $\eta$  известны как функции времени. При заданных начальных значениях переменных, проблема сводится к задаче Коши, которая может быть решена численными методами. Однако, самая большая трудность состоит в том, что темпы потенциального роста остаются неизвестными и должны быть объектом специального исследования.

Для оценки применимости уравнений (19) было рассмотрено развитие народного хозяйства США в течение последнего столетия, причем потенциальные темпы роста были заданы произвольно, немного большими чем темпы реального роста, чтобы воспроизвести эмпирические зависимости  $K$ ,  $L$  и  $P$  и изучить другие особенности поведения системы (Pokrovskii 2003). Начальные значения всех переменных, кроме технологических переменных, известны по эмпирическим данным. Начальные значения технологических переменных могут быть выбраны произвольно, потому что, вследствие уравнений релаксации из набора (19), начальные значения технологических переменных забываются через  $\tau \approx 1$  год. Однако, выбор технологических переменных должен соответствовать значениям технологического индекса  $\alpha$ .

Рис. 3. Технологические факторы в экономике США



Трудотребование (нижняя сплошная кривая) и энерготребование (средняя пунктирная кривая) пульсируют с периодом около четырех лет. Верхняя ступенчатая кривая показывает изменение моды развития от дефицита трудовых усилий (значение 2) к дефициту замещающей работы (значение 3) и обратно.

Вычисления на основе уравнений (19) воспроизводят реальную динамику системы со спадами и всплесками выпуска. Исследование обнаруживает пульсацию технологических факторов и изменения моды развития (Рис. 3), что связано с существованием альтернативных типов функционирования системы производства, описанной в секции 5. В рассмотренный период, только второй и третий типы мод реализуются в экономике США: период с предельным использованием труда сменяется периодом с предельным использованием работы замещения. Производство совершается при избытии инвестиций и сырья, но при дефиците трудовых усилий, когда  $d\lambda/dt < 0$ , или при дефиците работы замещения, когда  $d\lambda/dt < 0$ . Подробнее явление рассмотрено в работе (Pokrovskii 2011a).

## 6. Заключение

Рассмотренная теория сохраняет основные признаки неоклассического подхода, то есть, понятие стоимости, создаваемой производственными факторами, и само понятие производственных факторов непосредственно; теория может рассматриваться как обобщение и расширение обычного неоклассического подхода. В обсуждаемой технологической теории, услуга капитала используется как фундаментальный производственный фактор, в дополнение к традиционным производственным факторам неоклассической теории. Введение третьего производственного фактора — замещающей работы или услуги капитала, позволяет описать роль энергии в производстве стоимости, с одной стороны, и избавиться от недостатков традиционной неоклассической теории, с другой стороны. Основной капитал является средством привлечения трудовых и энергетических услуг к производству, сумма которых может служить мерой стоимости произведенных изделий и услуг (Beaudreau, Pokrovskii 2010). Человеческие усилия и работа внешних энергетических источников рассматриваются как истинные источники богатства.

Продемонстрировано, что рост производства вызван достижениями в технологическом потреблении труда и энергии. Это утверждение соответствует ясному пониманию того, что в последние столетия технологический прогресс является в конечном счете источником экономического роста в развитых странах. Технология меняется, и эти изменения могут быть включены в описание экономического роста, должным образом со-

ответствующее эмпирическим фактам. С физической точки зрения, главный результат технологического прогресса – замещение работы людей работой сторонних внешних источников энергии посредством различного сложного оборудования. Существенно, что рассматриваемый подход позволяет исследователям включить особенности технологии в описание и сформулировать феноменологическую (макроэкономическую, ценовые колебания не обсуждаются), теорию производства как систему эволюционных уравнений в односекторном и многосекторном приближениях (Pokrovskii 2011b).

### Библиография

- Aghion Ph., Howitt P. W. 1998. *Endogenous growth theory*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Aghion Ph., Howitt P. W. 2009. *The Economics of Growth*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Ayres R. U., Ayres L. W., Warr B. 2003. Exergy, power and work in the US economy, 1900–1998. *Energy* 28/3: 219–273.
- Beaudreau B. C. 1998. *Energy and Organization: Growth and Distribution Re-examined*. Westport, CT: Greenwood Press.
- Beaudreau B. C. 2005a. Engineering and Economic Growth. *Structural Change and Economic Dynamics* 16/2: 211–220.
- Beaudreau B. C. 2005b. *Energy rent. A scientific theory of income distribution*. New York, NY: iUniverse.
- Beaudreau B. C., Pokrovskii V. N. 2010. On the energy content of a money unit. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 389/13: 2597–2606.
- Blanchard O. J., Fisher S. 1989. *Lectures on Macroeconomics*. Cambridge: MIT Press.
- Blaug M. 1997. *Economic theory in retrospect*. 5<sup>th</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Brown M. 1966. *On the theory and measurement of technological change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cobb G. W., Douglas P. N. 1928. A Theory of Production. *American Economic Review Suppl.* 18/1: 139–165.
- Domar E. D. 1946. Capital expansion, rate of growth and employment. *Econometrica* 14: 137–147.
- Domar E. D. 1947. Expansion and employment. *American Economic Review* 37: 343–355.
- Ferguson C. E. 1969. *The Neo-Classical Theory of Production and Distribution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Griliches Z. 1979. Issues in Assessing the Contribution of Research and Development to Productivity Growth. *Bell Journal of Economics* 10: 92–116.
- Griliches Z. 1988. Productivity Puzzles and R & D: Another Nonexplanation. *Journal of Economic Perspectives* 2/4: 9–21.
- Grossman G. M., Helpman E. 1994. Endogenous Innovation in the Theory of Growth. *Journal of Economic Perspectives* 8/1: 23–44.
- Harrod R. F. 1939. An essay in dynamic theory. *Economic Journal* 49: 14–23.

- Harrod R. F. 1948. *Towards a Dynamic Economics*. London: Macmillan.
- Jorgenson D. W., Griliches Z. 1967. The Explanation of Productivity Change. *Review of Economic Studies* 34/3: 249–283.
- Jorgenson D. W., Stiroh K. 2000. Raising the Speed Limit: U.S. Economic Growth in the Information Age. *Brookings Papers on Economic Activity* 1: 125–211.
- Lotka A. J. 1925. *Elements of Physical Biology*. Baltimore, MD: Williams and Wilkins.
- Pokrovskii V. N. 1999. *Physical principles in the theory of economic growth*. Aldershot: Ashgate Publishing.
- Pokrovskii V. N. 2003. Energy in the Theory of Production. *Energy* 28/8: 769–788.
- Pokrovskii V. N. 2007. Productive energy in the US economy. *Energy* 32/5: 816–822.
- Pokrovskii V. N. 2011a. Pulsation of the growth rate of output and technology. *Physica A* 390/23–24: 4347–4354.
- Pokrovskii V. N. 2011b. *Econodynamics. The Theory of Social Production*. Dordrecht: Springer.
- Scott M. F. 1989. *A new view of economic growth*. Oxford: Clarendon Press.
- Solow R. 1957. Technical Change and the Aggregate Production Function. *Review of Economic Studies* 39: 312–330.