

УДК 519.87

ОБ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИННОВАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

© 2009 г. Иностраный член РАН А. А. Акаев, М. Хироока (Япония)

Поступило 11.11.2008 г.

Кризис мировой экономики, начавшийся в 2007 г. и вызванный проблемами в банковском секторе США, привел к замедлению развития во многих экономиках мира. Американская экономика вступила в фазу длительной нестабильности и сегодня стоит перед опасностью длительной рецессии. Возникает реальная угроза глобального замедления экономического роста. Сложившаяся ситуация предвещает новые кризисы и длительную депрессию в мировой экономике в предстоящем десятилетии.

Все это напомнило политикам, экономистам и бизнесменам о неравномерном, циклическом характере развития рыночной экономики и необходимости принимать энергичные меры по выявлению нового поколения базисных технологий и внедрению различных инноваций на их основе, чтобы максимально безболезненно преодолеть предстоящие кризисы и депрессию. В этой связи многие исследователи обратили взоры к грядущему большому циклу Кондратьева, подъем которого состоится вероятнее всего в 2020–2040 гг., и уже делают прогнозы относительно его параметров и ключевых базовых технологий [1–3]. Общим недостатком всех этих прогностических исследований является то, что они не учитывают нелинейной природы инновационно-технологического процесса, сопровождающего повышательную стадию кондратьевского цикла.

В настоящей работе, основываясь на стройной теории инновационно-технологического развития современной рыночной экономики, созданной Масааки Хироока [4], мы предлагаем компактную математическую модель для долгосрочного прогнозирования экономического развития с учетом цикличности и нелинейного характера инновационно-технологического процесса.

Еще в 1912 г. великий экономист XX столетия Йозеф Шумпетер указывал, что главной движущей силой экономического развития являются научно-технические инновации. Он писал [5], что когда какая-либо инновация внедряется в экономику, имеет место так называемый вихрь созидательного разрушения, подрывающий равновесие прежней экономической системы, вызывающий уход старых технологий, отживших организационных структур и появление новых отраслей, новых институциональных возможностей, в результате чего возникает небывалый динамизм экономического развития, который Шумпетер образно назвал эффектом фургона с оркестром. Инновации все больше выступают в роли локомотива экономического развития, определяя его эффективность и рост производительности труда. Инновации как процесс поддерживаются инвестициями и соответствующими институтами, без чего не действует механизм их реализации [4, 5]. Инвестиции без инноваций бессмысленны и порой даже вредны, поскольку означают вложение средств в воспроизводство устаревших товаров, продукции и технологий.

Научно-технический прогресс в целом и особенно инновационный процесс, как ныне общепризнано [4, 5], идет неравномерно во времени, ему присуща цикличность, следствием чего являются циклические колебания экономической деятельности. В центре внимания исследователей в XX столетии находились длинноволновые колебания, открытые выдающимся русским экономистом Николаем Кондратьевым [6]. Изучая в 1920-х годах закономерности происходящих в мировой экономике явлений, он обнаружил длинные циклы экономической конъюнктуры примерно полувековой длительности, которые получили название больших циклов Кондратьева. Он всесторонне обосновал закономерную связь повышательных стадий этих циклов с волнами технических изобретений и их практического использования в виде инноваций [6].

Й. Шумпетер развил учение Н. Кондратьева о больших циклах конъюнктуры и разработал ин-

*Институт математических исследований
сложных систем
Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова
Институт технэкономии Японии, Киото*

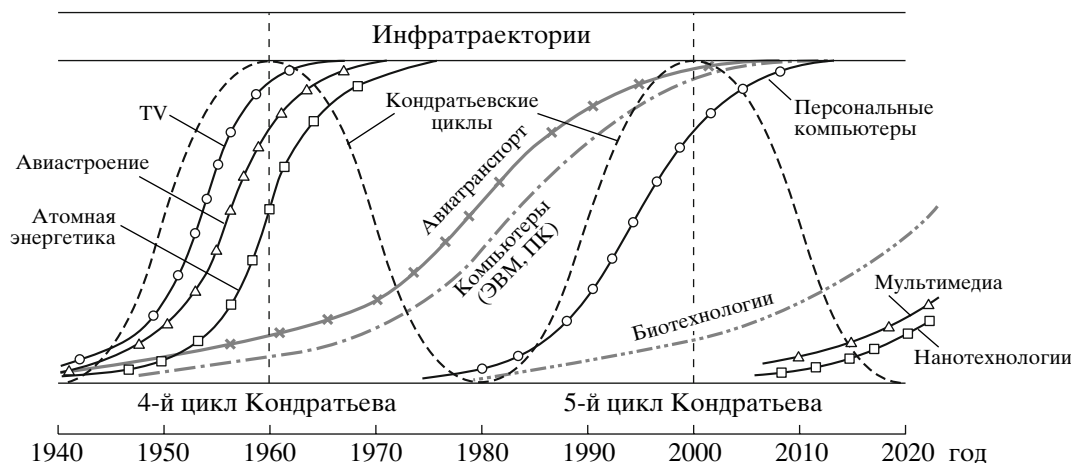


Рис. 1. Диффузия инноваций вдоль подъемов циклов экономической активности Кондратьева.

новационную теорию длинных волн, интегрировав ее в общую инновационную теорию экономического развития [7]. Циклическое движение величины национального дохода Шумпетер считает формой отклонения от равновесия, к которому всегда стремится экономическая система. Спонтанные сгустки нововведений вызывают радикальные изменения в экономике, которые уводят ее от изначальной равновесной траектории. Система уже никогда не возвращается к прежнему равновесному состоянию. Новый цикл начинается в период очередной депрессии на новом уровне равновесия. Смена уровней равновесия по Шумпетеру и определяет долговременную траекторию экономического развития, в ходе которого экономическая система находится в динамическом равновесии.

Совсем недавно М. Хироока [4] на основе обработки и анализа большого массива эмпирических данных доказал существование тесной корреляции нововведений и больших циклов Кондратьева и впервые подтвердил, что диффузия нововведений строго синхронизируется с повышательной волной кондратьевского цикла и нововведения достигают насыщения в области наивысшего пика цикла, как показано на рис. 1. При этом различные базисные инновации благодаря действию механизма самоорганизации формируют целый кластер и проявляются на стадии депрессии. Это явление установил Герхард Менш [8] и назвал его триггерным эффектом депрессии. Иначе говоря, депрессия заставляет предприятия искать возможности для выживания, а инновационный процесс может их предоставить, т.е. депрессия запускает процесс внедрения инноваций. Кластеры базисных технологий приводят к возникновению новых отраслей и запускают очередной большой цикл Кондратьева. Благодаря синергетическому эффекту взаимодействия инноваций внутри кластера они вызывают мощный

кумулятивный рост экономики и, таким образом, являются основным двигателем экономического развития.

Процесс диффузии инноваций детально и всесторонне изучен [9–12] и установлено, что он подчиняется логистическому уравнению Ферхюльста

$$\frac{dy}{dt} = ay(y_0 - y), \quad (1)$$

где y – спрос на товар в момент времени t , y_0 – предельная величина объема рынка, a – константа. Решением этого нелинейного уравнения является логистическая кривая, описываемая уравнением

$$y = \frac{y_0}{1 + c \exp(-ay_0 t)}. \quad (2)$$

Если ввести безразмерную переменную $F = \frac{y}{y_0}$, то

$$\frac{dF}{dt} = aF(1 - F), \quad F = \frac{1}{1 + c \exp(-at)}. \quad (3)$$

На практике продолжительность диффузии инновационного продукта на рынке принято выражать отрезком времени Δt между $F = 0.1$ и $F = 0.9$, который довольно точно отражает реальное время диффузии [4].

Нелинейный характер диффузии инноваций (2) означает, что каждая инновация имеет траекторию развития, которая достигает уровня насыщения (зрелости) в пределах определенного времени, означающего завершение жизненного цикла инновации. Это дает возможность идентифицировать любую инновацию, определяя временной отрезок траектории ее развития. М. Хироока установил, что жизненный цикл нововведений постепенно сокращался со времен первой промышленной ре-

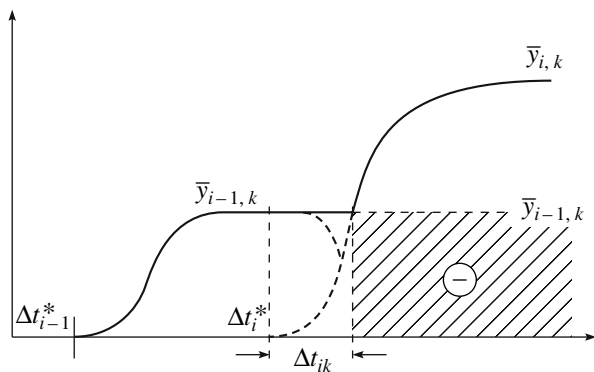


Рис. 2. Схема двухступенчатого расширения рынка для магистральной инновации.

волюции (XVIII век) с 90 до 25–30 лет в настоящее время.

Отдельные инновации распространяются за пределы одного цикла Кондратьева (см. рис. 1), способствуя появлению новых инфраструктур и сетей, формируя более длинную траекторию развития, которую М. Хироока назвал инфратраекторией (например, компьютеры, авиастроение, биотехнологии и др.). Указанные инновации называются магистральными (стволовыми); они сначала распространяются на новые рынки, но затем их потенциал расширяется, чтобы образовать новую инфраструктуру в экономике. Инфратраектории также образуют четко определенный кластер, причем каждый такой кластер имеет стержневую магистральную инновацию. Например, в текущем пятом кондратьевском цикле в этом качестве выступают компьютерные технологии. Магистральные инновации, в свою оче-

редь, также вызывают различные нововведения и институциональные изменения, которые способствуют значительному расширению рынков в следующем цикле Кондратьева. Подобное двухступенчатое расширение рынка, называемое также явлением восстановления, как показано на рис. 2, дает дополнительный мощный импульс развитию экономики за счет синергетического воздействия. Ярким примером явления восстановления может служить пример двухступенчатого расширения автомобильного рынка в США в XX веке.

М. Хироока установил, что инновационная парадигма состоит из трех логистических траекторий (рис. 3): технологической, разработки (развития) и диффузии [4]. Технологическая траектория представляет собой совокупность ключевых технологий, относящихся к рассматриваемой инновации, которая возникла в результате какого-либо значимого технического изобретения или научного открытия. Траектория разработки (освоения инновации) – это совокупность новых инновационных продуктов, полученных путем применения указанных ключевых технологий. Траектория разработки играет самую важную роль в инновационной парадигме, поскольку именно здесь осуществляется передача технологических знаний от академических институтов промышленности и возникает венчурные предприятия с целью промышленного освоения инновационного продукта с дальнейшей его коммерциализацией. Благоприятные возможности для венчурных предприятий имеют тенденцию концентрироваться в первые 10–15 лет траектории разработки. Именно в этот период, сразу после окончания технологической траектории, начинается интенсивная диффузия



Рис. 3. Структура инновационной парадигмы с тремя траекториями.

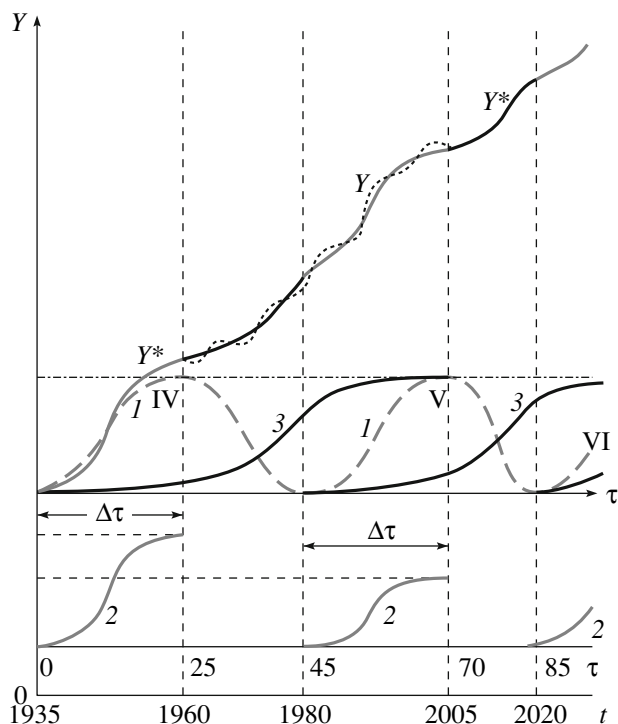


Рис. 4. Схема траектории движения общего выпуска Y (ВВП). 1 – циклы Кондратьева, 2 – траектории диффузии инновационных продуктов на рынки, 3 – инфратраектории.

инновационного продукта на рынок и продолжается она примерно 25–30 лет до момента насыщения рынка.

М. Хироока впервые выделил и исследовал траекторию развития технологии и показал, что она также описывается логистической кривой и длится также около 30 лет, начавшись с какого-либо значительного открытия или технического изобретения [4]. Таким образом, инновационная парадигма имеет каскадную структуру, состоящую из трех логистических траекторий, отстоя-

щих друг от друга на определенном фиксированном расстоянии, установленном эмпирическим путем. Это замечательное свойство инновационной парадигмы позволяет осуществлять довольно точное прогнозирование траектории диффузии инновационных продуктов на рынок по заранее установленной траектории развития технологии. Поскольку последняя опережает первую на 25–30 лет, она легко может быть построена еще до начала поступления новых продуктов на рынок [4]. Пользуясь этим обстоятельством, М. Хироока детально проанализировал траектории развития наиболее перспективных технологий будущего, которые могут сформировать кластер базисных технологий для предстоящего кондратьевского цикла: мультимедиа, нанотехнологии, биотехнологии, генная инженерия и регенерация человеческих органов, сверхпроводники и квантовые компьютеры. Он построил для всех указанных технологий траектории их развития и установил, что все они находятся на пороге коммерциализации и достигают зрелости в 2010–2015 гг., а это означает, что именно в эти годы начнется интенсивная диффузия инновационных продуктов на рынки, которая запустит предстоящий большой цикл Кондратьева с подъемом в 2020–2040 гг.

Исходя из новой инновационной парадигмы, установленной М. Хироока, зная текущие инфратраектории, которые определяются магистральными инновациями предыдущего цикла Кондратьева, а также траектории базисных инноваций текущего цикла Кондратьева, можно построить прогнозную траекторию динамики инновационно-экономического развития (рис. 4). Это достигается сложением суммарной добавленной стоимости, генерируемой базисными инновациями в текущем цикле Кондратьева, и добавленной стоимости, создаваемой институциональными изменениями и явлением восстановления, обусловленными инфратраекториями. При этом необходимо учесть, что в случае двухступенчатого расширения рынка, вызванного магистральной инновацией, возможен двойной (повторный) счет добавленной стоимости в текущем цикле Кондратьева, как это показано на рис. 2 (см. заштрихованный участок под горизонтальной линией $y = \bar{y}_{i-1,k}$, где $\bar{y}_{i-1,k}$ – объем рынка k -го инновационного продукта в $(i-1)$ -м цикле Кондратьева). На рис. 4 представлен период времени, охватывающий четвертый (IV) и пятый (V) кондратьевские циклы. Надежное прогнозирование может быть распространено, как минимум, до 2040 г., т.е. до верхнего пика шестого (VI) цикла Кондратьева.

Вернемся к сути предлагаемой методики прогнозирования. Допустим, что базисные инновации предстоящего i -го кондратьевского цикла известны (табл. 1). Тогда суммарную добавленную стоимость от инновационных продуктов в теку-

Таблица 1

i, j	Базисные инновации i -го цикла Кондратьева	Год завершения соответствующей (j -й) базисной технологии	Ожидаемый объем рынка
1	Мультимедиа	t_{i1}	y_{i1}
2	Нанотехнологии	t_{i2}	y_{i2}
3	Биотехнологии	t_{i3}	y_{i3}
4	Сверхпроводники	t_{i4}	y_{i4}
...
n	Квантовые компьютеры	t_{in}	y_{in}

щем i -м цикле Кондратьева можно вычислить по формуле

$$\Delta Y_i = \sum_{j=1}^n \frac{y_{ij}}{1 + c_{ij} \exp[-a_{ij} y_{ij}(t - t_{ij})]} \quad (4)$$

Здесь учитывается тот факт, что траектория диффузии инновационных продуктов описывается логистической кривой (2) и начинается только после того, как траектория развития технологии завершена. Однако, учитывая также то, что инновации собираются в кластер и диффузия инновационных продуктов на рынки синхронизируется с подъемом цикла Кондратьева, вместо аргумента $(t - t_{ij})$ можно взять $(t - t_j^*)$, где t_j^* – начало подъема цикла.

Таким же образом можно подсчитать суммарный вклад в ВВП от инфратраекторий, которые также описываются логистическими кривыми, но большей продолжительности, нежели траектории диффузии. Однако здесь требуется учесть вклад двух групп инфратраекторий, поскольку каждая группа инфратраекторий пересекает два цикла Кондратьева (см. рис. 1)

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{Y}_i = & \sum_{k=1}^m \frac{\bar{y}_{i-1,k}}{1 + \bar{c}_{i-1,k} \exp[-\bar{a}_{i-1,k} \bar{y}_{i-1,k}(t - t_{i-1}^*)]} + \\ & + \sum_{l=1}^s \frac{\tilde{y}_{i,l}}{1 + \tilde{c}_{i,l} \exp[-\tilde{a}_{i,l} \tilde{y}_{i,l}(t - t_i^*)]} - \\ & - \sum_{k=1}^m \bar{y}_{i-1,k} I(t - t_i^* - \Delta t_{i,k}). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\tilde{y}_{i,l}$ – ожидаемая емкость рынка, формируемого l -й инфратраекторией, исходящей из основания i -го цикла Кондратьева; $\bar{y}_{i-1,k}$ – ожидаемая емкость рынка, формируемого k -й инфратраекторией, исходящей из основания $(i - 1)$ -го цикла Кондратьева; t_i^* (t_{i-1}^*) – год начала подъема i -го ($(i - 1)$ -го) цикла Кондратьева; $I(t - t_i^* - \Delta t_{i,k})$ – единичная функция.

В приведенных выше формулах постоянные коэффициенты $c_{i,j}$, $a_{i,j}$, $\bar{c}_{i,k}$, $\bar{a}_{i,k}$ и $\tilde{c}_{i,l}$, $\tilde{a}_{i,l}$ определяют исходя из условия, что в первом случае длительность жизненного цикла инноваций $\Delta \tau = 25$ –30 лет, а во втором случае длительность жизненного цикла инфратраекторий равна длительности соответствующего цикла Кондратьева (40–50 лет) + $\Delta \tau$. Как же заранее определить ожидаемую величину емкости рынка новых продуктов? Для этого имеется оригинальная методика, основанная на логистическом анализе, которая подробно изложена в работе М. Хируоки [4].

Третье слагаемое в сумме (5) учитывает тот факт, что рынок магистральных нововведений значительно расширяется в следующем цикле Кондратьева и исключает повторный счет добавочной стоимости этих нововведений в новом цикле Кондратьева (см. рис. 2). Из рис. 2 следует также следующее уравнение для определения временного отрезка $\Delta t_{i,k}$:

$$\frac{\bar{y}_{i,k}}{1 + \bar{c}_{i,k} \exp[-\bar{a}_{i,k} \bar{y}_{i,k}(t_i^* - \Delta t_{i,k} - t_i^*)]} = \bar{y}_{i-1,k}.$$

Решая данное уравнение, получаем

$$\Delta t_{i,k} = \frac{1}{\bar{a}_{i,k} \bar{y}_{i,k}} \ln \frac{\bar{c}_{i,k} \bar{y}_{i-1,k}}{\bar{y}_{i,k} - \bar{y}_{i-1,k}}. \quad (6)$$

Текущее значение ВВП теперь определяется весьма просто:

$$Y_i^* = Y_0^* e^{qt} + \Delta Y_i + \Delta \tilde{Y}_i, \quad (7)$$

где Y_0^* – начальное значение ВВП в год начала прогнозирования, которое совпадает с началом подъема i -го цикла Кондратьева; q – темп сбалансированного роста традиционных отраслей экономики.

Первое слагаемое в формуле (7) означает, что традиционные (уже существующие) отрасли экономики развиваются по модели сбалансированного роста, что предполагает постоянный темп роста q , который определяется по формуле [13]

$$q = n + \frac{g}{\alpha}, \quad (8)$$

где n – темп роста активного населения, α – доля оплаты труда в национальном доходе, g – темп роста технического прогресса в традиционных отраслях экономики. Действительно, традиционные отрасли экономики также поглощают инновации через механизм слияния технологий [4], увеличивая тем самым производимую добавленную стоимость. Темп технического прогресса в традиционных отраслях g главным образом определяется характеристиками слияния технологий.

Формулы (4)–(7) удобны для прогнозирования экономического развития на повышательной стадии кондратьевского цикла с учетом того, что рассмотрение начинается с начала подъема цикла.

Если же требуется прогноз на понижательной стадии, начиная с пика, тогда необходимо пользоваться формулой (см. рис. 4)

$$Y_i^* = \bar{Y}_0^* e^{qt} + \sum_{l=1}^s \frac{\tilde{y}_{i,l}}{1 + \tilde{c}_{i,l} \exp[-\tilde{a}_{i,l} \tilde{y}_{i,l}(t - t_i^*)]}, \quad (9)$$

где \bar{Y}_0^* – начальное значение ВВП на пике цикла Кондратьева.

Формулы (4)–(7) и (9) представляют собой компактную математическую макро модель для долгосрочного прогнозирования динамики экономического развития с учетом большого цикла экономической конъюнктуры Кондратьева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузык Б.Н., Яковец Ю.В. Россия-2050. Стратегия инновационного прорыва. М.: Экономика, 2005. 620 с.
2. Мировая экономика: прогноз до 2020 года / Под ред. А.А. Дынкина. М.: Магистр, 2007. 429 с.
3. Клинов В. // Вопр. экономики. 2008. № 5. С. 62–79.
4. Hirooka M. Innovation Dynamism and Economic Growth. A Nonlinear Perspective. Cheltenham; Northampton (MA): Edward Elgar, 2006. 426 p.
5. Шумпетер Й. Теория экономического развития. М.: Прогресс, 1982. 455 с.
6. Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения. М.: Экономика, 2002. 767 с.
7. Schumpeter J.A. Business Cycles. N.Y.: McGraw-Hill, 1939. 1095 p.
8. Mensch G. Stalemate in Technology – Innovations Overcame the Depression. N.Y.: Ballinger, 1979.
9. Griliches Z. // Econometrica. 1957. V. 24. № 4. P. 501–522.
10. Fisher J.C., Pry R.H. // Technol. Forecasting and Soc. Change. 1971. V. 3. P. 75–88.
11. Мэнсфилд Э. Экономика научно-технического прогресса. М.: Прогресс, 1970. 238 с.
12. Сахал Д. Технический прогресс: концепции, модели, оценки. М.: Финансы и статистика, 1985. 366 с.
13. Столерю Л. Равновесие и экономический рост. М.: Статистика, 1974. 472 с.