



Методология моделирования и прогнозирования мировой динамики



Садовничий В.А., Акаев А.А., Коротаев А.В., Малков С.Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики/Научный совет по Программе фонд. исслед. Президиума Российской академии наук «Экономика и социология знания». М.: ИСПИ РАН, 2012 (Экономика и социология знания). 360 с.

Существующие методы моделирования мировой динамики: возможности и ограничения

Акаев Аскар —
иностранный член РАН,
профессор, д.т.н.
**Садовничий Виктор
Антонович** —
академик РАН,
профессор, д.ф.-м.н.

Математическое моделирование мировой динамики ведет свое начало с докладов видного американского ученого Джея Форрестера знаменитому Римскому клубу¹ в конце 1960-х — начале 1970-х гг. относительно применения разработанных им моделей системной динамики для целей долгосрочного эколого-экономического прогнозирования (Форрестер, 1978). Главный вопрос, который интересовал тогда Римский клуб, состоял в определении степени устойчивости экономической модели, господствовавшей на Западе после Второй мировой войны. Эта модель предполагала динамичный рост и неограниченное расширение при использовании ресурсоемких технологий. Доклады Форрестера показали, что продолжение стратегии ресурсоемкого роста в условиях имевшего место

в тот период небывалого демографического роста неизбежно приведет либо к острой нехватке ресурсов в мире, либо к катастрофическому загрязнению окружающей среды, способному вызвать глобальный экологический кризис.

МОДЕЛЬ ФОРРЕСТЕРА

Джей Форрестер, профессор Массачусетского технологического института, является родоначальником построения моделей мирового развития. Он разработал аппарат «системной динамики», позволяющий имитировать с помощью ЭВМ развитие различных сценариев в динамике сложных систем. Аппарат был построен на основе достижений теории систем и компьютерного моделирования с использованием языка обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Форрестером, по заказу Римского клуба, были созданы первые математические модели мировой динамики *Мир-1* и *Мир-2* (1971–1972), положившие начало моделированию глобальных процессов. В 1971 г. Форрестер опубликовал первые результаты компьютерного моделирования мировой динамики в ставшей популярной книге «*Мировая динамика*» (М.: Наука, 1978), в которой он впервые предпринял попытку описать основные процессы экономики, демографии, роста загрязнения окружающей среды и их взаимодействие и обусловленность в планетарном масштабе.

Прежде всего Форрестер выделил наиболее существенные мировые процессы. На тот момент ими оказались следующие: 1) быстрый рост населения; 2) индустриализация и связанный с ней промышленный рост, вызывающий за-

грязнение окружающей среды; 3) нехватка продовольствия; 4) рост отходов производства; 5) нехватка природных ресурсов. Таким образом, Мир-система, по Форрестеру, состоит из следующих основных подсистем: население, основные фонды (капитал), сельскохозяйственные фонды, невозобновляемые природные ресурсы, загрязнение окружающей среды.

Следовательно, мировая динамика может быть описана пятью основными глобальными переменными, как функциями, зависящими от времени: 1) N — численность населения Земли; 2) K — основные фонды (капитал); 3) X — доля фондов в сельском хозяйстве; 4) R — объем невозобновляемых природных ресурсов; 5) Z — количество загрязнений окружающей среды. Форрестер полагал, что влияние основных переменных N , K , X , R и Z друг на друга в основном сказывается через естественные процессы взаимодействия и вспомогательные факторы, такие как, например, повышение трудности добычи невозобновляемых ресурсов по мере их истощения. Кроме указанных переменных Форрестер ввел еще одно понятие — качество жизни Q , носящее характер индикатора функционирования исследуемой системы. Качество жизни задается априори в виде произведения четырех унитарных сомножителей:

$$Q = Q_C Q_F Q_N Q_Z, \quad (1.1)$$

где $Q_C Q_F$ — зависимость качества жизни соответственно от материального уровня жизни (C) и от питания (F); $Q_N Q_Z$ — отражают влияние факторов N и Z на качество жизни как соответствующих функциональных зависимостей.

Для построения имитационных моделей, описывающих динамику Мир-системы, используются однотипные обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка в форме:

$$\frac{dy_i}{dt} = f_i^+ - f_i^-, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1.2)$$

где f_i^+ — правая часть уравнения, включающая в себя все факторы, вызывающие рост переменной y_i , а f_i^- — включает все факторы, вызывающие убывание переменной y_i . Предполагается также, что эти слагаемые правой части могут быть представлены в виде произведения функций, зависящих только от факторов F_j , которые, в свою очередь, сами являются функциями от основных переменных y_i . Например,

$$f_i^+ = \phi_i^+(F_1, F_2, \dots, F_m) = \phi_{i1}^+(F_1) \phi_{i2}^+(F_2) \dots \phi_{im}^+(F_m), \quad (1.3)$$

где $F_j = \Psi_j(y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jl})$, $j = \overline{1, m}$, причем $m < n$, $l < n$. Отсюда следует, что количество факторов должно быть меньше, чем основных переменных, и каждый фактор зависит не от всех основных переменных, а только от части из них. Эти ограничения были необходимы для того, чтобы упростить задачу моделирования.

Таким образом, имеется система ОДУ (1.2) с правыми частями в форме (1.3). Для решения этой системы, ОДУ первого порядка необходимо задать начальные условия в определенный момент времени:

$$t = T_0 : y_i|_{t=T_0} = y_{i0}. \quad (1.4)$$

Эти условия вместе с ОДУ (1.2) определяют задачу Коши. При определенных условиях существует единственное

решение данной задачи Коши. Следовательно, задание начального условия (1.4) однозначно определяет динамику Мир-системы.

В модели мировой динамики Форрестера присутствует, соответственно, пять обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих пять глобальных переменных. В общем случае — это пять нелинейных ОДУ. Расчеты по этой математической модели Форрестер проводил для временного интервала с 1900 по 2100 г. Год 1970-й был принят за опорный, поскольку данные расчетов сопоставлялись с имеющейся статистикой по временному интервалу 1900–1970 гг. Это дало возможность, во-первых, отладить и верифицировать саму модель, а во-вторых, подтянуть плохо известные параметры модели. А с 1970 г. расчеты являются уже чисто прогнозными. Конечно, выбранный горизонт прогнозирования до 2100 г. не позволяет говорить о приемлемой надежности и точности прогноза за пределами XX столетия, поскольку в модели напрямую не учитывается технический прогресс, который играет ключевую роль в долгосрочном развитии. А за 130 лет трижды меняется технологический уклад (Глазьев, 1993), что существенным образом сказывается на вековой траектории эколого-экономического развития. Однако для такого рода модели Форрестер и не ставил задачи точного предсказания, целью моделирования является выявление тенденций развития системы и ее качественных характеристик. По сути, модель Форрестера является моделью динамики индустриальной экономики. В целом, сценарный анализ модели выявил

угрозу кризиса во взаимоотношении человечества и природы в XXI в. и показал существование «глобального равновесия» при условии самоограничений и решении ресурсной проблемы. Как считал Форрестер, единственный путь избежать кризиса, связанного с экспоненциальным ростом, — это переход к глобальному равновесию, когда переменные системы выходят на стационарные значения и не меняются. В принципе, осуществить полную стабилизацию в рамках модели Форрестера невозможно, поскольку ресурсы могут только убывать во времени. Тем не менее для остальных переменных возможно достичь выхода на стационарные значения, хотя и для ограниченных временных интервалов.

МОДИФИКАЦИИ МОДЕЛИ ФОРРЕСТЕРА. МОДЕЛЬ МИР-3

Римский клуб поддержал ряд последующих проектов по глобальному моделированию и исследованию взаимозависимости различных процессов мировой динамики. Прямым продолжением модели Форрестера стала модель *Мир-3*, разработанная его талантливым учеником Денисом Медоузом и международной исследовательской группой. В модели *Мир-3* была проведена дезагрегация переменных при сохранении 5 основных подсистем, как у Форрестера. Правда, в последней версии модели *Мир-3–91* была добавлена шестая подсистема «управление». Кроме того, Медоуз ввел в модель большее количество взаимосвязей, примерно в 3 раза превышающее число взаимосвязей, использованных Форрестером. В результате была построена система из 12 нелинейных ОДУ для основных переменных.

Расчеты по модели *Мир-3* показали, что несмотря на большую детализацию, ее прогнозы качественно и количественно оказались весьма близки к результатам, полученным по модели *Мир-2*. В модели *Мир-3* не удалось преодолеть ни одного из основных недостатков базовой модели Форрестера. Дело в том, что излишнее усложнение модели без принципиального ее усовершенствования привело лишь к тому, что идентификация параметров системы еще более затруднилась, поскольку их стало в 3 раза больше, тогда как объем объективных статистических данных оставался крайне малым.

Тем не менее результаты, полученные с помощью модели *Мир-3* и опубликованные в 1972 г. в книге «*Пределы роста*», которая стала первым официальным докладом Римского клуба, получили широкий резонанс в мире и оказали заметное влияние на общечеловеческое представление о мировом развитии. В указанной книге впервые высказывались предостережения о серьезных угрозах, которые могут возникнуть на пути к устойчивому развитию человечества из-за сокращения запасов энергосносителей и других сырьевых ресурсов, а также вследствие интенсивного загрязнения окружающей среды. Эти выводы имели большой резонанс в мире, их следствием стало более пристальное внимание к экологическим проблемам, широкое внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий производства. Ответственные политические лидеры, осознав опасность сохранения старой экономической модели, предприняли попытки перейти к новой экономике, основанной на знаниях.

Вместе с тем возникла также серьез-

ная критика с различных точек зрения. По мнению специалистов, модель мировой динамики Форрестера-Медоуза была слишком механистична и обща, в ней не описывалась региональная структура Мир-системы, имели место расхождения с теориями экономического роста, недостаточно учитывалось влияние социальных и технологических инноваций. Действительно, модель Форрестера-Медоуза позволяет вести только поиски сценария, предотвращающего кризисную ситуацию, путем компьютерного моделирования ряда последовательных сценариев с усиливающимися ограничениями на интенсивность потребления ресурсов и загрязнения окружающей среды. Модель не позволяет решать задачи управления процессами, влияющими на развитие мировой динамики.

Д. Медоуз и его соратники на протяжении почти 40 лет непрерывно исследовали физические пределы роста, накладываемые исчерпанием природных ресурсов и ограниченной способностью биосферы Земли поглощать промышленные и сельскохозяйственные загрязнения. Накопленные за это время результаты они опубликовали в книге (Медоуз, Рандерс, Медоуз, 2008), в которой снова подтверждают свой научно обоснованный вывод о том, что тенденции современного экономического и промышленного развития — это путь, ведущий к глобальному экологическому кризису. Вместе с тем они также убедительно показывают возможности для человечества, не останавливая экономическое развитие и не снижая уровень жизни в развитых странах, перейти к модели устойчивого развития человечества.

МОДЕЛЬ МЕСАРОВИЧА-ПЕСТЕЛЯ

В проекте «Стратегия выживания» М. Месарович и Э. Пестель (Mesarovic, Pestel, 1974) сформулировали задачу построения модели мировой динамики, основанной на теории многоуровневых иерархических систем и отражающей процессы взаимодействия человека с окружающей средой, а также комплекс экономических, социальных и политических взаимоотношений в обществе. Модель должна была быть управляемой и включать в себя процесс принятия решений человеком. А самое главное, мир предлагалось рассматривать не как единое однородное целое, а как систему взаимодействующих регионов, различающихся уровнем развития и социально-экономической структурой.

В модели Месаровича-Пестеля все страны мира в соответствии с их социально-экономической структурой и уровнем развития были разбиты на 10 регионов. Каждый регион описывался системой специальных подмоделей с одинаковой структурой. Связь регионов осуществляется через импорт, экспорт и миграцию населения. Основными подмоделями являются подмодели экономики, демографии и энергетики. Обратные связи между отдельными подмоделями, как правило, отсутствуют. Это приводит к жесткому варианту определения эндогенных переменных для подмоделей, использующих в качестве входной информации расчеты других подмоделей. В этих подмоделях ряд параметров остается неопределенным. Управление реализуется выбором того или иного сценария путем задания значений неопределенных параметров. Сценарий же выбирается лицом, принимающим решения

Таблица 1. Математические модели глобального развития (1970-е гг. — первая волна)

Авторы. Организация, учреждение	Уровни МИР-СИСТЕМЫ. Основные переменные	Теория и принципы	Итоговые модели	Публикации
Форрестер Дж. Родоначальник построения математических моделей системной динамики Массачусетский технологический институт (МТИ), США	МИР-СИСТЕМА N — числен. насел. K — капитал физич. X — доля капитала в сельском хоз-ве R — объем невозобн. ресурсов Z — кол-во загрязн. окр. среды	Теория и принципы системной динамики Математические модели мировой динамики $\begin{cases} \frac{dy_i}{dt} = f_i^+ - f_i^-, i=1, n; \\ y_i(t=T_0) = y_{i0}; n=5 \end{cases}$	МИР-1 (1971) МИР-2 (1972) По заданию Римского клуба	Мировая динамика М: Наука, 1978 (1971 англ.)
Медоуз Д., Рандерс Й., МТИ, США Римский клуб	МИР-СИСТЕМА Добавлена подсистема «управление». Произведена дезагрегация переменных	Детализация и уточнение модели Форрестера Математическая модель: система из 12 нелинейных ОДУ	МИР-3 Официальный доклад Римского клуба	Пределы роста. 30 лет спустя. М.: Академкнига, 2008 (1972 англ.)
Месарович М. (США) Пестель Э. (ФРГ) Римский клуб	МИР-СИСТЕМА Разделена на 10 взаимодейст- вующих регионов Каждый регион описывается системой подмоделей	Теория многоуровневых иерархических систем. Теория управления и принятия решений	Подмодели экономики, демографии и энергетики на основе структурных ДУ	Mankind at the Turning Point. Second report to the Club of Rome, 1974

(ЛПР), — человеком, проводящим компьютерное моделирование.

Модели Форрестера-Медоуза и Месаровича-Пестеля были основными среди глобальных моделей первой волны. Основные характеристики этих моделей представлены в табл. 1.

В результате прогнозных расчетов по модели Месаровича-Пестеля было показано, что миру угрожает не глобальная катастрофа (приблизительно в середине XXI в., как следует из результатов модели Мир-3), а серия региональных ка-

тастроф, которые начнутся значительно раньше и по разным причинам для разных регионов. Таким образом, авторы видят будущее человечества в длительных разнообразных региональных кризисах — экологических, энергетических, продовольственных, сырьевых, демографических. Последствия региональных катастроф будут ощущаться во всем мире, и избежать глобальной катастрофы можно лишь согласованными усилиями международного сообщества — таким был вывод Месарови-

ча и Пестеля. Они утверждали, что эти кризисы могут постепенно охватить всю планету, если международное сообщество не предпримет усилия по достижению сбалансированного развития всех частей Мир-системы. Поэтому свою концепцию мирового развития Месарович и Пестель назвали «органичным ростом». Таким образом, несомненным достоинством этой модели является деление Мир-системы на взаимодействующие регионы, а также специализация и направленность подмоделей на решение конкретных проблем.

РАЗВИТИЕ ГЛОБАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СССР

Советские ученые с самого начала приняли активное участие в работе Римского клуба, подключились к исследованиям по глобальному моделированию и стали, по существу, лидерами второй волны исследований по глобальному моделированию. Работы велись широким фронтом во ВНИИ-системных исследований под руководством академика Д.М. Гвишиани и в Вычислительном центре Академии наук под руководством академика Н.Н. Моисеева. Ключевой инновацией в этих исследованиях стало введение управляющих параметров и изучение возможностей управления глобальными процессами. Было доказано существование управлений, позволяющих отодвинуть, смягчить или даже предотвратить негативные последствия глобального развития (Геловани, Егоров и др., 1975). Вместе с тем также была показана высокая чувствительность глобальных моделей к исходным гипотезам, базовой статистической информации (Геловани, Бритков, 1979). Отсюда следовал вывод,

что возможности применения математических методов управления и оптимизации имеют ограниченное практическое применение для такого рода макромоделей. Поэтому дальнейшее развитие глобального моделирования в СССР пошло по пути совершенствования инструментария компьютерной поддержки принятия решений и процессов информационного обеспечения в рамках модифицированной модели Форрестера-Медоуза. Конкретными результатами этих исследований стали знаменитая модель «Ядерная зима», созданная под руководством Н.Н. Моисеева (Моисеев, Александров, Тарко, 1985), и доклад «На пороге третьего тысячелетия (глобальные проблемы и процессы развития СССР)», подготовленный под руководством В.А. Геловани. Подробнее обо всем этом можно прочитать в статье (Дубовский, 2010).

Впервые модель мировой динамики с управлением была предложена В.А. Егоровым (Егоров, 1980). Идея разработчика заключалась в том, чтобы создать новые отрасли индустрии по утилизации и восстановлению ресурсов, по очистке окружающей среды от загрязнений и рекультивации земель. Тогда можно осуществлять управление процессами использования природных ресурсов, загрязнения окружающей среды, производства продовольствия путем направления требуемых объемов капитала в соответствующие отрасли. Естественно, что это требует перераспределения капиталовложений, которое может быть оптимизировано по определенному критерию. В математической модели идея управления переменной реализуется путем добавления в правую часть соответствующего ОДУ (2) до-

полнительного слагаемого, содержащего в виде коэффициента долю капитала, направляемого в новую отрасль, обслуживающую i -ю подсистему. Последняя и служит в качестве одного из управляющих параметров. Если задать все управляющие параметры как функции времени, то они определяют некоторый сценарий развития Мир-системы. Далее решается задача оптимального управления по заданному критерию.

Группой академика В.М. Матросова была создана детальная модифицированная модель Форрестера-Медоуза с управлением В.А. Егорова (Матросов, Измоденова-Матросова, 2005). Отличие этой модели состояло в том, что в ней не ставилась задача оптимизации по какому-либо критерию. При этом законы изменения управляющих параметров были жестко определены и вдобавок введены функциональные связи между управляющими параметрами и основными переменными модели. Модификация модели Форрестера состояла, в частности, в использовании более точных уравнений, описывающих системные переменные. Например, сектор экономики описывается неоклассической производственной функцией, выражающей динамику ВВП и учитывающей движение капитала, демографическую динамику и научно-технический прогресс. В рамках полученной модели были найдены стационарные решения и доказана их устойчивость. К недостаткам данной модели следует отнести усложнение модификации, затрудняющей ее идентификацию.

Основные характеристики глобальных моделей второй волны, разработанных в СССР, представлены в *табл. 2*.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Следующая волна интереса к вопросам прогнозирования будущего родилась в 1990-е гг. в связи с приближением третьего тысячелетия и естественным желанием заглянуть в новый век, новое тысячелетие. В этот период было выполнено множество исследований, авторы которых стремились осмыслить итоги бурного XX века, с его двумя мировыми войнами, небывалым развитием научно-технического прогресса и демографическим взрывом, а также представить мировое развитие в XXI в. В итоге родилось много футурологических предсказаний и научной фантастики, не имевшей прямого отношения к глобальному моделированию.

Кстати, само глобальное моделирование в 90-е гг. прошлого столетия резко затормозилось, хотя для изучения различных аспектов мировой динамики было создано по всему миру множество научно-исследовательских учреждений и лабораторий. Огромное количество людей было занято этой работой. Однако постепенное усложнение моделей привело к тому, что они перестали выражать истинные причинно-следственные закономерности. Большинство экспертов сходятся во мнении о том, что разработавшиеся в 1980-е гг. сложные модели не оправдали возлагавшихся на них ожиданий, поскольку не позволили предсказать реальное развитие экономических процессов. С. Капица (Капица, 2008, с. 24) в этой связи приводит примечательное высказывание американского экономиста, лауреата Нобелевской премии Герберта Саймона о том, что «сорок лет опыта модели-

рования сложных систем на компьютерах, которые с каждым годом становятся все больше и быстрее, научили, что грубая сила не поведет нас по царской тропе к пониманию таких систем... тем самым моделирование потребует обращения к основным принципам, которые приведут нас к разрешению этого парадокса сложности».

В последние годы в мире наблюдается новый подъем активности в области геополитического, экологического и социально-экономического прогнозирования будущего. Это связано с обострением экологических и энергетических проблем человечества. Продовольственная проблема также может суще-

ственно обостриться со значительным ростом численности населения. К сожалению, нагрузка со стороны человечества на окружающую среду продолжает расти, несмотря на развитие технологий и усилия общественных организаций. Положение осложняется тем, что человечество уже вышло за разумные пределы и находится в области неустойчивого развития.

Таким образом, на рубеже веков четко обозначилась крайне важная и актуальная задача обеспечения устойчивого развития в масштабах всего человечества (Медоуз, Рандерс, Медоуз, 2008). Достижение устойчивого экономического роста делает не только возможным, но

Таблица 2. Глобальное моделирование и устойчивое развитие с управлением (СССР — Российская Федерация)

Авторы и авторские коллективы. Организация, учреждение	Терия и принципы	Модели	Публикации
Академик Гвишиани Д.М., Геловани В.А., Бритков В.Б., Дубовский С.В. и др. ВНИИСИ РАН	Ключевая инновация — введение управления и изучение возможностей управления глобальными процессами	1. Усовершенствование модели Форрестера и инструментария компьютерной поддержки. 2. Мир-система из 9 регионов	Доклад: «На пороге третьего тысячелетия (глобальные проблемы и процессы развития СССР)», 1984
Академик Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. ВЦ АН СССР	Учение о ноосфере. Системный анализ. Математические модели климата и глобальных биогеохимических циклов	1. Глобальная модель биосферы. 2. Модель «Ядерная зима»	Человек и биосфера. М.: Наука, 1985
Профессор Егоров В.А. и группа соратников ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	Впервые предложено использование теории оптимального управления к процессам мировой динамики	Математическая модель мировой динамики с управляющими параметрами	Математические модели глобального развития. Л.: Гидрометеиздат, 1980
Академик Матросов В.М. и группа соратников СО РАН	Устойчивое развитие. Замена отдельных типовых ДУ на структурные ДУ	Модифицированная модель Форрестера-Медоуза с управлением Егорова В.А.	Учение о ноосфере, глобальное моделирование и устойчивое развитие. М.: Academia, 2005

и необходимым условием разработку долгосрочных прогнозов, позволяющих формировать долгосрочные цели и стратегию их достижения. Следует отметить, что социально-экономические прогнозы ведутся в различных временных диапазонах — от краткосрочных (до одного года), среднесрочных (от 1 до 5 лет) до долгосрочных (от 5 до 30–50 лет).

Если цель краткосрочных моделей — прогнозирование, направленное на конъюнктурную деятельность, а задача среднесрочных моделей заключается в выборе политики развития и строительства в ближайшем будущем, долгосрочные модели предназначены для исследования условий длительного экономического роста. Долгосрочные модели являются прежде всего моделями теории роста в том смысле, что они представляют собой инструмент для исследования будущего состояния общества в зависимости от стратегии его развития.

В последние годы мы являемся свидетелями появления серьезных научных прогнозов, рассчитанных на три десятилетия и даже полувековую перспективу, например прогнозы корпорации «ПрайсУотерхаусКуперс» — «Мир в 2050 г.» (The world in 2050, 2006) и фирмы «Голдман Сакс» — «Мечтая вместе со странами БРИК: путь в 2050 год» (Wilson, Purushothaman, 2003). Однако, как правило, такие прогнозы по силам лишь крупным междисциплинарным исследовательским коллективам. Во многих странах мира сегодня разрабатываются подобные прогнозы на десятилетия, а то и на 30–50 лет вперед. В этих прогностических проектах и подобных проектах последнего времени были использованы весьма упрощенные модели,

которые вряд ли удовлетворяют современным требованиям. Например, при построении математических моделей, описывающих динамику социально-экономического развития, используется неоклассическая модель долгосрочного экономического роста Солоу, основанная на традиционной производственной функции Кобба-Дугласа:

$$Y = AK^{\alpha}L^{1-\alpha}, \quad (1.5)$$

где K — физический капитал, L — численность рабочей силы, A — технический прогресс или совокупная производительность факторов, α — доля дохода, которая обеспечивается за счет роста капитальных затрат. Под техническим прогрессом Р. Солоу понимает не только новые технологии, но и новый уровень знаний и умений рабочей силы, а также новые формы организации производства. Однако развитие человеческого капитала лучше учитывается в моделях эндогенного экономического роста, упрощенный вариант которых был использован в модели корпорации «ПрайсУотерхаусКуперс». Следует отметить, что в большинстве глобальных моделей первого и второго поколений для описания блока экономической динамики также использовались различные модификации неоклассической модели роста Солоу.

Главным недостатком рассмотренной модели является то, что в ее основе лежит экономика предложения. Следовательно, модель игнорирует фактор платежеспособного спроса и исходит только из ожидаемой динамики факторов производства. Однако эпоха экономики предложения ушла надолго вместе с неоклассической экономической тео-

рией. Снова наступает эпоха экономики спроса, кейнсианская эпоха. Отсюда следует, что новые динамические макромоделли в экономике должны строиться с учетом совместного действия равновесного долгосрочного роста и циклических колебаний вокруг него, определяемых соотношением спроса и предложения. Это и есть основное направление для усовершенствования используемых сегодня математических макромоделей динамики социально-экономического развития.

Именно взаимодействие циклических колебаний и тренда роста позволяет выявить точки бифуркации, в которых экономическая система теряет устойчивость и может погрузиться в кризисную рецессию (Акаев, 2008). Таким образом, рассмотрение совместного взаимодействия циклических колебаний и роста позволяет прогнозировать время наступления кризиса, тогда как традиционные модели описывали только трендовые траектории и не могли предсказывать кризисы и рецессии. Именно последнее критики рассматривали как главный недостаток глобальных моделей первого и второго поколений.

Что же касается глубоких циклических кризисов, повторяющихся каждые 30–40 лет и связанных со сменой технологического уклада, сменой больших циклов Кондратьева, то для их прогнозирования необходимо синхронизировать долгосрочные модели с реальными Кондратьевскими циклами либо в мировом масштабе, либо в рамках национальной экономики. Синхронизация позволяет надежно и относительно точно установить горизонт прогнозирования, который определяется продолжи-

тельностью очередного большого цикла Кондратьева и измеряется 30–40 годами. Также важно, что в данном промежутке времени действует один и тот же технологический уклад, что гарантирует стабильность характеристик технического прогресса и, следовательно, постоянство параметров производственной функции (1.5). Дело в том, что параметры производственной функции, во-первых, различны даже для стран, находящихся на одинаковом уровне экономического развития, а во-вторых, они различны на различных этапах развития одной и той же страны. Поэтому синхронизация модели экономического роста с большим циклом Кондратьева облегчает проблему идентификации этих параметров. В моделях Форрестера-Медоуза и Месаровича-Пестеля принималась гипотеза о постоянстве указанных параметров на значительных временных периодах порядка 100 лет, что, естественно, не выполняется, поскольку в такой период укладывается два технологических уклада, каждому из которых соответствуют свои значения параметров. Этим во многом объясняется низкая точность указанных моделей, которая становится неприемлемой при больших горизонтах моделирования с целью прогнозирования.

Одним из основных недостатков глобальных моделей первого поколения явилось описание выбранных глобальных процессов с помощью однотипных дифференциальных уравнений стандартного вида (1.2), не учитывающих внутренние свойства и механизмы развития соответствующих процессов. Форрестер и Медоуз и их последователи описывали правые части уравнений (1.3) так, как это принято в эконометри-

ке, — на основе обработки имеющихся рядов статистических данных, которые в большинстве случаев были крайне скудными. Этим объяснялась низкая точность результатов глобального моделирования первой волны. Отсюда последовали поправки — при разработке глобальных моделей второго поколения упор был сделан на структурные модели, описывающие внутренние механизмы воздействия факторов, определяющих развитие динамики основных глобальных процессов и Мир-системы в целом.

Структурные модели глобальных процессов основываются на соответствующих научных теориях, вскрывающих сущность этих процессов, причинные связи внутри них. Ярким примером могут служить глобальные модели взаимодействия человека и биосферы Земли, разработанные под руководством академика Н.Н. Моисеева (Моисеев, Александров, Тарко, 1985). Неотъемлемой составной частью этих моделей стала климатическая модель, опирающаяся на достижения классической науки: гидроаэромеханику, термодинамику и вычислительную математику. Важно то, что данная климатическая модель позволяла выявить изменения климатических характеристик, возникающих вследствие антропогенных факторов. Благодаря этому модель впервые в 1983 г. позволила провести анализ климатических последствий гипотетической ядерной войны и увидеть, как в течение года после ядерной катастрофы меняются климатические параметры, возникает и постепенно просветляется ядерная ночь. Конечно, путем составления типовых уравнений Форрестера вида (1.2) ничего подобного достичь бы не удалось.

Поэтому одним из важнейших направлений усовершенствования моделей глобальных процессов остается использование структурных моделей как наиболее надежных и достоверных. Структурные модели уже широко используются в демографическом и экономическом прогнозировании, что мы покажем в настоящей работе. Следует отметить, что структурные модели социально-экономических процессов в корне отличаются от структурных моделей физических явлений. В отличие от физических явлений социально-экономические процессы являются обычно самоорганизующимися, саморазвивающимися, то есть они сами принимают участие в программировании своего поведения. Для моделирования подобных систем недостаточно описать внутреннюю структуру взаимодействия ее элементов, необходимо еще предусмотреть появление новых свойств самоорганизации и саморазвития, которые нельзя вывести из свойств отдельных частей системы (Голанский, 1983).

Однако эта специфика социально-экономических процессов не всегда учитывается при их моделировании. Например, модель Форрестера-Медоуза, созданная в виде взаимодействия контуров обратных связей подсистем, игнорировала целостные характеристики общественной системы, сводя их к простой сумме свойств составляющих подсистем. На этот недостаток модели Форрестера-Медоуза указывали авторы второй прогностической модели, подготовленной для Римского клуба, — М. Месарович и Э. Пестель. Реализация принципа развития подсистем исходя из интересов целого требует построе-

ния иерархической многоуровневой модели, а именно этого-то сделать названным авторам и не удалось.

Иерархическое динамическое моделирование мировой динамики

Проведенный выше анализ имеющихся моделей и подходов к моделированию и прогнозированию мирового развития свидетельствует о наличии нерешенных до настоящего времени проблем и об актуальности создания иерархической системы математических моделей для описания макротенденций и циклов мировой и региональной динамики. В данной системе моделирования целесообразно выделить три взаимосвязанных иерархических уровня:

- моделирование общих тенденций развития мира как целостной системы;
- моделирование особенностей региональной динамики; при этом глобальная динамика предстает как результат региональных взаимодействий и противоречий;
- моделирование социально-экономической динамики отдельных стран в контексте мирового и регионального развития.

Соответствующим образом должен быть сформирован состав моделей:

- на первом уровне моделирования — модель динамики Мир-системы как целого, предназначенная для анализа трендов мирового развития;
- на втором уровне моделирования — модели региональной динамики, предназначенные для более детального описания глобальных социально-экономических изменений с учетом

неравномерности развития отдельных стран и регионов мира;

- на третьем уровне моделирования — модели отдельных стран, предназначенные для анализа и прогноза их развития в условиях имеющихся внешних ограничений и сценариев, сформированных на первом и втором уровнях моделирования.

Модели каждого из уровней должны быть сконструированы таким образом, чтобы имелась возможность конкретизации и расширения их возможностей для решения частных задач. Таким образом, модели должны иметь «ядро», описывающее наиболее важные, базовые процессы, относящиеся к каждому уровню моделирования, и позволять достраивать к «ядру» отдельные блоки для более детального описания частных явлений и процессов.

Выше были выделены и сформулированы три наиболее важных направления совершенствования глобального моделирования. Все они для наглядности сведены в *табл. 3*.

Отдельно нужно сказать о важности учета циклических процессов в мировой динамике, связанных с неравномерностью развития технологий и инноваций.

Кризис мировой экономики, начавшийся в 2008 г. и вызванный проблемами, возникшими в финансовом секторе США, привел к замедлению во многих развитых и развивающихся экономиках мира. Американская экономика вступила в фазу длительной нестабильности и испытала глубокую рецессию. Сохраняется реальная угроза новой волны экономического спада. Сложившаяся ситуация предвещает новые кризисы и длительную депрессию

Таблица 3. Основные направления совершенствования математического моделирования глобальных процессов

Направления совершенствования	Что достигается
Использование закономерностей социально-экономического и геополитического развития, вытекающих из теории больших циклов Кондратьева	Надежный горизонт прогнозирования порядка 30–40 лет
Учет воздействия краткосрочных циклических колебаний (автоколебаний) на трендовую траекторию долгосрочного развития для выявления критических явлений	Определение точек бифуркации и точек срыва в кризисную экономическую рецессию
Использование структурных дифференциальных уравнений для описания глобальных процессов, путем их вывода из закономерностей и механизмов протекания соответствующих процессов	Высокая точность и надежность, упрощение математических моделей

в мировой экономике в предстоящем десятилетии.

Все это в очередной раз 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 связи с этим многие исследователи (Глазьев, 2010; Клинов, 2010) 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.

Еще в 1912 г. великий экономист XX столетия Йозеф Шумпетер указывал, что главной движущей силой экономического развития являются научно-технические инновации. Он писал (Шумпетер, 1982), что когда какая-либо инновация внедряется в экономику, имеет место так называемый вихрь созидательного разрушения, подрывающий равновесие прежней экономиче-

ской системы, вызывающий уход старых технологий, отживших организационных структур и появление новых отраслей, новых институциональных возможностей, в результате чего возникает небывалый динамизм экономического развития. 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. 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, развивается неравномерно во времени, а именно — циклически. Следствием этого являются циклические колебания экономической деятельности. В центре внимания исследователей в XX столетии находились длинноволновые колебания, открытые выдающимся русским экономистом Николаем Кондратьевым

(Кондратьев, 2002). Изучая в 1920-х гг. закономерности происходящих в мировой экономике явлений, он обнаружил длинные циклы экономической конъюнктуры примерно полувековой длительности, которые получили название больших циклов Кондратьева. Ученый всесторонне обосновал закономерную связь «повышательных» стадий этих циклов с волнами технических изобретений и их практического использования в виде инноваций.

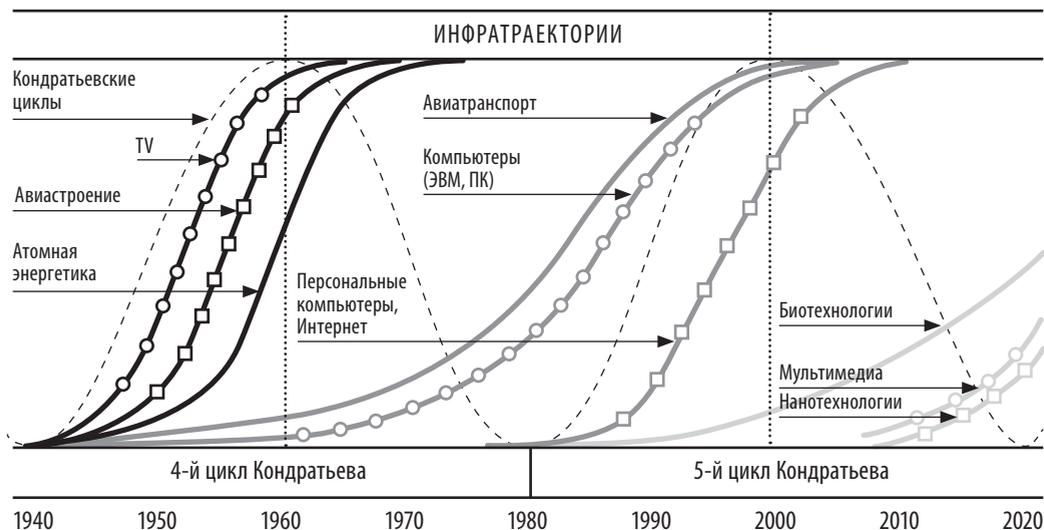
Й. Шумпетер развил учение Н. Кондратьева о больших циклах конъюнктуры и разработал инновационную теорию длинных волн, интегрировав ее в общую инновационную теорию экономического развития (Schumpeter, 1939). Циклическое движение выпуска Шумпетер считает формой отклонения от равновесия, к которому всегда стремится экономическая система. Спонтанные ступки 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. Поскольку теория больших циклов Кондратьева играет ключевую роль в инновационной теории экономического развития Шумпетера, а также учитывая, что сам Шумпетер полагал ее краеугольным элементом собственной теории, последнюю справедливо будет именовать в дальнейшем

«инновационно-циклической теорией экономического развития Шумпетера-Кондратьева».

Совсем недавно М. Хироока (Hirooma, 2006) 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 достигает своего созревания в области наивысшего пика цикла, как показано на *рис. 1*. Причем различные базисные инновации, благодаря действию механизма самоорганизации, формируют целый кластер и появляются группой на стадии депрессии. Это явление установил Герхард Менш (Mensch, 1979) и назвал его «триггерным эффектом депрессии». Иначе говоря, депрессия заставляет предприятия искать возможности для выживания, а инновационный процесс может их предоставить, то есть депрессия запускает процесс внедрения инноваций. Кластеры базисных технологий приводят к возникновению новых отраслей и, в свою очередь, запускают очередной большой цикл Кондратьева. Благодаря синергетическому эффекту взаимодействия инноваций внутри кластера инициируется мощный кумулятивный рост экономики, что указывает на основную движущую роль инноваций в экономическом развитии.

Отдельные инновации распространяются за пределы одного цикла Кондратьева к следующему циклу (см. *рис. 1*), способствуя появлению новых инфраструктур и сетей, формируя более длинную траекторию развития,

Рисунок 1. Диффузия инноваций вдоль подъемов циклов экономической активности Кондратьева



которую М. Хироока назвал инфратраекторией (например, компьютеры, авиастроение, биотехнологии и др.). Указанные инновации называются магистральными (стволовыми); они сначала распространяются, создавая 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 (V) Кондратьевском цикле в этом качестве выступают компьютерные технологии.

Исходя из новой инновационной парадигмы, установленной Хироокой, зная текущие инфратраектории, которые определяются магистральными инновациями предыдущего цикла Кондратьева, а также траектории базисных инноваций текущего цикла Кондратьева, мы сможем построить

прогнозируемую траекторию динамики инновационно-экономического развития как это показано графически на [рис. 2](#). Это достигается путем сложения суммарной добавленной стоимости, генерируемой базисными инновациями в текущем цикле Кондратьева, а также добавленной стоимости, создаваемой институциональными изменениями и явлением восстановления, обусловленными инфратраекториями. Траектория движения ВВП имеет характерный ступенчатый вид, причем, как и утверждал Шумпетер, каждая ступень описывается лучше всего логистической кривой, являющейся следствием изменения экономической конъюнктуры в соответствии с фазами большого цикла Кондратьева. На [рис. 2](#) представлен период, охватывающий четвертый (IV) и пятый (V) Кондратьевские циклы. Надежное прогнозирование может быть распространено, как минимум, до 2040 г., то

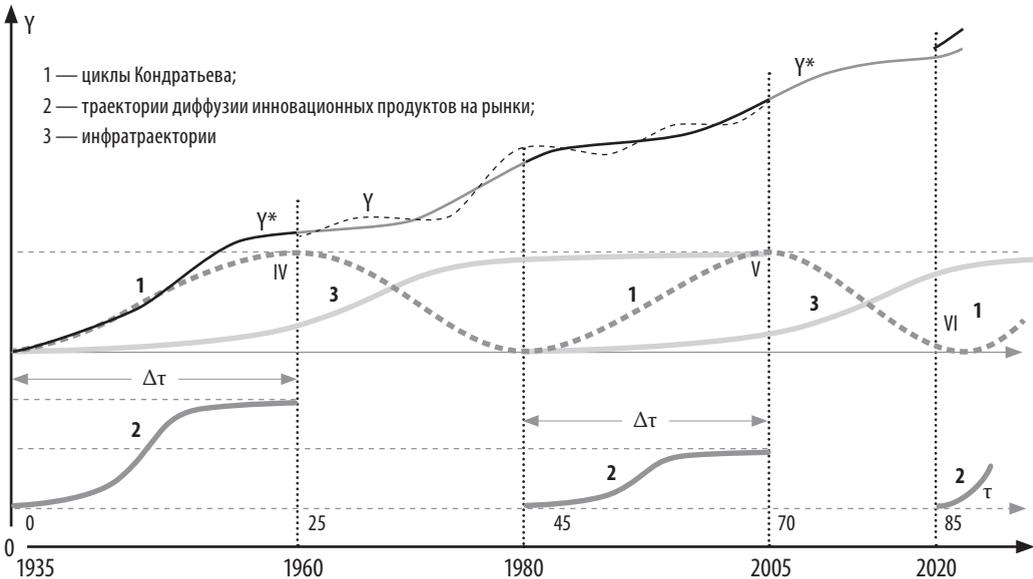
есть — верхнего пика шестого (VI) цикла Кондратьева.

Описанный выше процесс инновационно-циклического развития рыночной экономики был формализован и описан в работе (Акаев, Хироока, 2009).

В 80-е гг. прошлого века, после очередного мирового экономического кризиса, исследованию теории и практическим приложениям больших циклов Кондратьева было уделено повышенное внимание и появилось огромное число работ на эту тему, в том числе по разработке математических моделей. Однако математические модели той поры были направлены на качественный анализ циклических колебаний, на определение их ключевых параметров — продолжительности цикла, характерных точек и т.д. Одна из первых математических моделей длинной волны Кондратьева была

предложена в работе С.М. Меньшикова и Л.А. Клименко (Меньшиков, Клименко, 1984). Она представляла собой систему дифференциальных уравнений первого порядка с запаздываниями. Модель естественно генерирует колебания, подобные колебаниям экономической конъюнктуры в циклах Кондратьева. Она также позволяет весьма приближенно оценить продолжительность цикла и поворотные точки длинных волн. С.В. Дубовский разработал более совершенную модель (Дубовский, 1995), в которой циклическое развитие встроено в модель экономического роста. В этой модели динамика ВВП описывается дифференциальным уравнением, полученным из неоклассической модели роста Солоу, и дополнена инвестиционной моделью, соответствующей технологическим циклам, генерирующим циклы Кондратьева. Модель Дубовского так-

Рисунок 2. Графическая схема построения траектории движения общего выпуска Y (ВВП)



же позволяет проводить качественный анализ решения дифференциального уравнения и более точно определять периоды длинных волн, соответствующих большим циклам Кондратьева, а также характерные точки, связанные с подъемами и спадами цикла Кондратьева.

Важной задачей является продолжение этих исследований с целью количественного описания механизма инновационно-циклического экономического развития Шумпетера-Кондратьева, чтобы помимо качественного анализа влияния циклических колебаний на долгосрочный рост уметь рассчитывать траекторию движения ВВП, оценивать продолжительность циклов и прогнозировать моменты кризисной рецессии в экономике.

Основными объектами в создаваемой системе иерархического моделирования — прогнозирования являются экономика, демография, научно-технический прогресс, природные ресурсы и экология. Они определяют па-

раметры порядка — те медленные переменные, под поведение которых будут подстраиваться остальные. Ключевыми параметрами порядка на протяжении мировой истории были и остаются — численность населения (N), доступные ресурсы (R), уровень технологий (A) и образования (E), а также зависящий от них национальный доход (Y). В последующих разделах дается конкретная реализация изложенной в настоящем параграфе программы совершенствования глобального математического моделирования.

Примечание

1. Римский клуб (Club of Rome) — международная неправительственная организация, деятельность которой направлена на стимулирование изучения глобальных проблем. Создана в 1968 г. по инициативе крупнейшего итальянского общественного деятеля и бизнесмена Аурелио Печчеи.