

С.Ю.Малков Иерархическая система моделирования мировой динамики // Проекты и риски будущего. Концепции, модели, инструменты, прогнозы / Отв. ред. А. А. Акаев, А. В. Коротяев, Г. Г. Малинецкий, С. Ю. Малков. – М.: КРАСАНД, 2011, с.208-231.

Часть III

ИНСТРУМЕНТЫ

Глава 10

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ МИРОВОЙ ДИНАМИКИ

С. Ю. Малков

Введение

Необходимость долгосрочного прогнозирования мировых демографических, экономических, экологических процессов была остро осознана в середине двадцатого века. Первыми системными работами в этой области были работы, выполненные по заказу «Римского клуба», созданного в 1968 году по инициативе Аурелио Печчеи. Эти работы имели большой резонанс и вызвали интерес к этой тематике во всем мире. Моделированием и прогнозированием глобальных процессов стали заниматься различные организации по всему миру, включая ООН. Однако в настоящее время моделирование глобальных процессов переживает определенный кризис, проявлением которого явилось то, что несмотря на наличие большого количества разнообразных моделей, финансово-экономические потрясения 2008 года не были внятно предсказаны. Чтобы понять причину этого методологического кризиса, коротко проанализируем историю глобального моделирования, начиная с первых работ Римского клуба – с проектов Дж. Форрестера («Мировая динамика», 1971 г.), Д. Медоуза («Пределы роста», 1972 г.),

М. Месаровича – Э. Пестеля («Человечество перед выбором», 1974 г.) (Дадаян 1984).

Проекты **Дж. Форрестера** и **Д. Медоуза** были первой попыткой построения глобальных моделей, предназначенных для исследования процессов экономического развития мира. В модели Дж. Форрестера МИР-2 региональное деление отсутствует, мир представлен как единое целое. В качестве основных уровней, на которых строится система, было выбрано пять: население; капиталовложения (фонды); часть фондов, вкладываемых в сельское хозяйство; природные ресурсы; загрязнение. Каждому из этих уровней соответствует определенная (уровневая) переменная: численность населения мира; общий объем капитальных вложений; удельный вес в общем объеме вложений инвестиций, направляемых в сельское хозяйство; мировые запасы природных ресурсов; показатель загрязнения окружающей среды. По числу названных переменных в модели выделено пять блоков, объединенных прямыми и обратными связями. Прогнозные расчеты были выполнены до 2100 г. и показали следующее. При сохранении существующих тенденций истощение природных ресурсов приведет к замедленному росту капитальных вложений вследствие возрастания цен на сырье, а отсюда – к замедленному росту объема производства. В связи с замедлением роста производства и соответственно снижением темпов роста потребления упадет уровень жизни, а затем уменьшится численность населения планеты. Выходом из сложившегося положения является «глобальное равновесие», которое предполагает стабилизацию уровней переменных: численности населения, которая будет сбалансирована равенством рождаемости и смертности; объема капитальных вложений; загрязнения окружающей среды.

Дальнейшее развитие модель Дж. Форрестера получила в работах группы исследователей под руководством Д. Медоуза, построивших усложненный вариант модели – МИР-3, в которой, однако, сохранено много важных черт модели Дж. Форрестера. В частности, выделено пять взаимосвязанных секторов: население, капитал, сельское хозяйство, невозобновимые природные ресурсы, загрязнение окружающей среды. В модели МИР-3 региональная разбивка также отсутствует. Однако Д. Медоуз ввел в модель большое количество взаимосвязей, примерно в 3 раза превышающее число взаимосвязей, используемых Дж. Форрестером.

К недостаткам моделей Дж. Форрестера и Д. Медоуза можно отнести следующее: в них не учитываются социальные факторы, отсутствует учет технологического развития. Высокий уровень агрегации приводит к недоучету территориальных особенностей изучаемых процессов, что, в свою очередь, ведет к игнорированию региональных социально-экономических различий при моделировании процессов мировой динамики. К недостаткам системы моделей МИР-2 и МИР-3 относятся также и весьма произвольные предположения о конкретном виде регулирующих функций. Се-

рьезной трудностью при построении таких систем моделей является недостаток, а иногда и полное отсутствие статистической информации для проведения расчетов. Вследствие этого многие факторы учитываются при помощи всевозможных оценок, причем не всегда объективных, а это неизбежно ведет к субъективности в выводах, сделанных на основе расчетов по подобным моделям.

В проекте «Человечество перед выбором» **М. Месаровича и Э. Пестеля**, как и в проекте «Пределы роста», в основу исследования заложена глобальная модель динамики мировой системы. Стремясь к большей детализации, авторы представили мир в виде 10 взаимодействующих регионов: 1) Северная Америка; 2) Западная Европа; 3) Япония; 4) Австралия, Южная Америка; 5) СССР и страны Восточной Европы; 6) Латинская Америка; 7) Ближний Восток и Северная Африка; 8) остальная часть Африки; 9) Юго-Восточная Азия; 10) Китай. Каждый регион описывается специальной системой подмоделей: их структура одна и та же для всех регионов, отличие – в начальных данных и значениях параметров. Связь регионов осуществляется через импорт, экспорт и миграцию населения. По функциональному признаку модель каждого региона в отдельности имеет следующие подмодели: экономики, демографии, питания, энергии, нефтяных ресурсов. В вертикальном срезе комплекса предполагается поэтапное разукрупнение информации в регионально-отраслевом разрезе. Однако деление мировой системы на регионы выполнено формально: модели различных регионов не учитывают их специфику. Часто анализ объективных причинно-следственных связей подменяется формальной экстраполяцией существующих отношений на весь исследуемый отрезок времени.

В подмоделях целый ряд параметров в системе уравнений остается неопределенным. Управление осуществляется выбором того или другого сценария, т.е. набором значений этих параметров на всем рассматриваемом промежутке времени. Сценарий выбирается лицом, принимающим решение (ЛПР – человеком, проводящим исследование проблемы). Для каждой модели заранее определяется конечный набор возможных сценариев. Они объединяются в дерево допустимых решений. ЛПР выбирает приемлемый с его точки зрения сценарий путем исследования в режиме диалога с ЭВМ дерева допустимых решений. После выбора сценария система становится замкнутой и ЭВМ просчитывает ее траекторию. Схема обращения ЛПР к ЭВМ имеет следующий вид: ЛПР задает сценарий (управление); ЭВМ просчитывает траекторию; ЛПР знакомится с результатами; если результат его не удовлетворяет, ЛПР задает новое управление; и т.д.

Работа группы М. Месаровича – Э. Пестеля явилась новым шагом в моделировании процессов мирового развития. Они ввели в модель деле-

ние мировой системы на взаимодействующие регионы, включили возможности управления и участия человека в процессах принятия решения.

Вслед за работами Римского клуба с середины 70-х годов работы по глобальному моделированию развернулись во многих странах мира, значительно расширился арсенал применяемых методологических принципов и типов моделей. Так, по заказу ООН группой американских ученых во главе с **В. Леонтьевым** была разработана глобальная межотраслевая модель для прогнозирования важнейших показателей развития мировой экономики на период 1970 – 2000 гг. Основные результаты расчетов по данной модели были представлены в докладе экспертов ООН «Будущее мировой экономики», опубликованном в 1977 г. в Нью-Йорке. Проект имеет заранее определенную целевую установку: выяснить, при каких обстоятельствах достижимы выдвинутые Организацией Объединенных Наций задачи, связанные с преодолением все увеличивающегося разрыва между экономикой развитых и развивающихся регионов.

Мировая экономическая система в проекте рассматривается в разрезе 15 регионов, объединенных в три группы.

Развитые страны: Северная Америка, страны Западной Европы с высоким и средним доходом, СССР, страны Восточной Европы, Япония, Океания, Южная Африка.

Развивающиеся страны I группы: страны Латинской Америки со средним доходом, страны Ближнего Востока – экспортеры нефти, страны Тропической Африки.

Развивающиеся страны II группы: страны Латинской Америки с низким доходом, страны Азии с низким доходом, Африканские страны засушливого пояса, социалистические страны Азии.

В основу классификации положен уровень экономического развития регионов, оцениваемый в проекте по показателям объема ВВП на душу населения и доли обрабатывающей промышленности в ВВП.

Каждый региональный блок мировой модели, построенный по единой схеме (модель типа затраты – выпуск), содержит пять групп уравнений: макроэкономические балансовые уравнения; балансовые уравнения затраты – выпуск; уравнения, описывающие загрязнение окружающей среды и борьбу с ним; балансовые уравнения инвестиций; уравнения мирохозяйственных связей (всего 2625 линейных уравнений и тождеств. Каждый регион описывается 269 переменными и 175 уравнениями, причем 229 переменных отражают положение внутри региона, а 40 – его внешнеэкономические связи. Количество переменных модели существенно превышает число уравнений, что обеспечивает значительное число степеней свободы, устраняемых заданием экзогенных значений ряда переменных).

Модель носит сугубо экономический характер, не учитывает социальные аспекты. При всей своей громоздкости она претендует лишь на опи-

сание текущих материальных балансов, для проведения прогнозных оценок необходимо задание специальных сценариев экзогенным образом.

Вслед за В. Леонтьевым многие исследовательские центры стали осуществлять разработку моделей данного класса. Особое место среди глобальных проектов занимает макромодельный комплекс по синтезу национальных экономических моделей – LINK, разработанный под руководством **Л. Клейна** для оказания непосредственной консультативной помощи американским правительственным органам.

Проект LINK представляет собой совокупность различных по размерам и структуре (годовых и квартальных, с укрупненными финансовыми секторами, ориентированных на спрос и предложение) экономических моделей национальной экономики ряда стран и регионов, которые разработаны организациями разных стран и увязаны в единую систему посредством субмодели мировой торговли на основе итеративной процедуры, обеспечивающей соответствие ограничению – равенству экспорта и импорта в мировой торговле. В систему LINK на конец 70-х годов входили модели следующих стран и регионов: Австралия, Австрия, Бельгия, Великобритания, Италия, Канада, Нидерланды, США, Финляндия, Франция, ФРГ, Швеция, Япония, развивающиеся страны (модели ЮНКТАД для четырех регионов: Южной Америки, Юго-Восточной Азии, Ближнего и Среднего Востока, Африки), социалистические страны (модели серии СОВМОД Уортонской ассоциации эконометрических прогнозов; модели СЭВ, разработанные ЮНКТАД). Проект LINK представляет собой систематически обновляемый и расширяющийся модельный комплекс. Входящие в него модели постоянно совершенствуются и заменяются, дополнительно строятся и включаются в систему новые модели для других стран. Расчеты мировой торговли в системе LINK проводятся в разрезе четырех товарных групп. Мир в модели предстает как совокупность отдельных стран, объединенных мировой торговлей.

Недостатками модели являются ее сугубо экономический характер, краткосрочность, невозможность использования для долгосрочных прогнозов. Использование эконометрических методов в качестве методической базы для проведения расчетов ограничивает возможности моделирования: достоверные результаты возможны лишь для периодов плавного бескризисного развития.

В настоящее время существует большое количество моделей, описывающих экономическую динамику мира, однако принципы построения этих моделей в основном продолжают традиции описанных выше подходов.

Таким образом, история создания моделей мировой динамики имела следующие особенности:

216 Иерархическая система моделирования мировой динамики

- в первых моделях Дж. Форрестера и Д. Медоуза мир описывался как единое целое, что, с одной стороны, позволило выявить глобальные тенденции мирового развития, но с другой стороны, оказалось достаточно сильным упрощением;
- дальнейшая эволюция моделирования пошла по пути детализации и конкретизации моделей: мир стал описываться как совокупность регионов, а затем – отдельных стран. По существу, мир превратился в сумму отдельных стран (при этом целостность потерялась);
- модели становились все более сложными из-за стремления путем введения большого количества учитываемых факторов повысить адекватность моделирования, получить достаточно точные количественные оценки;
- моделирование имело сугубо экономическую направленность. Внеэкономические факторы, как правило, либо не учитывались, либо учитывались как экзогенные характеристики, рассматриваемые лишь в той мере, в которой они влияют на экономический рост.

Развитие моделирования по данному пути породило ряд серьезных проблем:

- по мере усложнения моделей происходила потеря прозрачности моделирования, поскольку увеличение количества формально учитываемых факторов приводит, как правило, не к повышению точности, а к ухудшению понимания логики процессов, к превращению моделирования в «колдовство» с параметрами;
- сугубо экономический характер моделей обедняет и искажает получаемые результаты, не позволяет понять глубинную логику глобальных процессов;
- модели создаются для описания настоящего и предсказания будущего, но при этом они не объясняют прошлое, не верифицируются на исторических данных, поэтому степень их достоверности не ясна, приходится принимать их на веру;
- модели имеют трендовый характер и не учитывают циклической динамики (этим, в частности, была обусловлена их неспособность предсказать мировой финансово-экономический кризис 2008 года).

Для преодоления данных проблем необходимо заново осмыслить принципы, положенные в основу моделирования мировой динамики. Надо избежать искуса усложнения моделей, сделать их более прозрачными, но при этом необходимо не утратить, а нарастить уровень их системности. Для этого надо:

- учитывать не только экономические, но и демографические, социальные, культурные показатели как эндогенные, рассматривать мировую динамику системно в многообразии различных (а не только экономических) ее аспектов;
- при этом по возможности минимизировать количество переменных, чтобы обеспечить прозрачность моделирования;
- учесть не только трендовую, но и циклическую динамику (экономические, политические, социальные циклы);
- верифицировать модели на исторических данных.

Работы в этом направлении ведутся в рамках исследований по подпрограмме Президиума РАН «Комплексный системный анализ и моделирование».

мировой динамики». Ниже кратко изложены методические результаты исследований по созданию иерархической системы моделирования мировой динамики, полученные на настоящий день.

Общий подход к моделированию мировой динамики

Вообще говоря, изложенные выше требования к моделям мировой динамики являются противоречивыми. Действительно, суть их в том, чтобы расширить возможности моделирования, но при этом не увеличивая, а уменьшая количество переменных. Возможно ли это (до сих пор традиции моделирования были противоположными: считалось, что для увеличения точности моделирования необходимо увеличение количества учитываемых факторов, при этом модели становились все более и более сложными)? Не является такая постановка задачи утопией?

Представляется, что данная научная задача выполнима. Основой такого оптимизма являются успехи, достигнутые при моделировании сложных эволюционирующих систем в физике, биологии, экономике в последние десятилетия. Анализ результатов данных работ позволяет сформулировать следующую программу действий:

Надо отказаться от стремления создать единую комплексную модель, предназначенную для решения всего круга вопросов, связанных с анализом мировой динамики. Это тупиковый путь. Надо разбивать крупные задачи на ряд вложенных подзадач, каждую из которых целесообразно решать в рамках своей частной расчетной модели. Данные модели могут отличаться составом переменных, используемыми показателями, методами вычислений, самой идеологией моделирования (это все должно определяться спецификой конкретной решаемой подзадачи). Главное – чтобы они были согласованы по входам и выходам и представляли собой иерархию взаимосвязанных и взаимодополняющих моделей. Целесообразность такого разделения обусловлена тем, что на каждом уровне проявляются свои закономерности, которые сложно (а порой и невозможно) выявить на другом уровне. Применительно к моделированию и прогнозированию мировой динамики целесообразно выделить трех взаимосвязанных иерархических уровней:

- моделирование общих тенденций развития мира как целостной системы. Здесь должны быть выявлены наиболее общие закономерности, характеризующие исторический процесс и проявляющиеся именно на этом, глобальном уровне (как сказал поэт: «лицом к лицу – лица не увидеть: большое видится на расстоянии»);
- моделирование особенностей региональной динамики. Этот срез важен, поскольку глобальная динамика является результатом региональных взаимодействий и противоречий;
- моделирование социально-экономической динамики отдельных стран в контексте мирового и регионального развития.

Аналогом первого уровня являются модели Форрестера – Медоуза, аналогом второго уровня являются модели Месаровича – Пестеля. На третьем уровне целесообразно использовать динамические модели, позволяющие исследовать реакцию социальных систем на изменение внешних условий.

Результатом моделирования на первых двух уровнях является определение исходных данных и ограничивающих условий для решения оптимизационных задач на третьем уровне моделирования, где исследуются оптимальные стратегии развития отдельных стран. При этом технология описания глобальных процессов на первом уровне моделирования изменяется по отношению к технологии, использовавшейся Дж. Форрестером.

Технология конструирования модели Дж. Форрестера заключалась в том, чтобы определять динамику исследуемых переменных (численности населения, объемов основных фондов и т.д.), математически описывая процессы, приводящие к увеличению и уменьшению значений этих переменных. Описание данных процессов в аналитическом виде для сложной социальной системы представляет собой трудновыполнимую (а часто и невыполнимую) задачу, поэтому Дж. Форрестер описывал эти процессы так, как принято в эконометрике – на основе обработки имеющихся рядов статистических данных. Необходимые по детальности ряды статистических данных имеются только с начала середины XX века, поэтому реализованный подход может описывать только краткосрочные и среднесрочные (по историческим меркам) процессы длительностью в несколько десятков лет, более долгосрочные тенденции с его помощью выявить невозможно.

Чтобы расширить временные рамки моделирования мировой динамики требуется изменение используемого Дж. Форрестером подхода: на макроуровне имеет смысл моделировать не сами процессы (они весьма многообразны и могут сильно отличаться друг от друга в различные временные периоды), а их результаты. По существу речь идет о моделировании динамики ограничений, накладываемых на исследуемые процессы. Для анализа долгосрочных тенденций, как правило, важны не детали процессов, а объемы доступных ресурсов, емкости имеющихся ниш (экономических, демографических, экологических и др.) и макропропорции (макросоотношения) базовых процессов, обеспечивающих заполнение этих ниш в результате активной человеческой деятельности при использовании имеющихся технологий.

Здесь важно отметить специфику социальных процессов: это процессы с обратной положительной связью в условиях внешних ограничений. Положительная обратная связь есть следствие активности людей с их творческими возможностями, что позволяет постоянно выявлять новые ресурсы и достаточно быстро их осваивать за счет изобретения новых технологий. На стадии освоения новых ресурсов и распространения новых технологий социальные процессы (экономические, демографические, политические) идут с ускорением, базовые характеристики увеличиваются экспоненциально (см. рис.1), ниши не заполнены. Это динамическая стадия развития, для которой характерно отсутствие равновесий, характер ее протекания зависят от деталей процессов, которые должны учитываться в моделях.

Рис. 1. Типичное изменение характеристик социальных процессов во времени (логистическая кривая)



Когда ресурсы приходят к истощению и выявляются серьезные ограничения в их использовании, то положительная обратная связь сменяется на отрицательную обратную связь, процессы приходят в насыщение (см. рис.1), ситуация стабилизируется, уравнивается. Такие ситуации хорошо описываются равновесными моделями балансового типа. Динамические уравнения здесь нужны не для описания самих процессов, а для описания изменения объема ниш и ограничений, накладываемых внешними условиями.

Таким образом, иерархическую систему моделирования мировой динамики целесообразно строить следующим образом:

1) первый уровень моделирования – модель динамики мир-системы как целого, предназначенная для анализа трендов мирового развития. Она включает в себя динамические уравнения, описывающие изменение объема ресурсных ниш и ограничений на их использование. На первом этапе моделируются макротенденции, на втором – анализируется и описывается динамика возникновения, освоения, использования и истощения ресурсных ниш, вносящая циклическую (колебательную) компоненту в исторические тренды;

2) второй уровень моделирования – модель региональной динамики, предназначенная для более детального описания глобальных социально-экономических изменений и освоения ресурсных ниш и с учетом неравномерности развития отдельных стран и регионов мира. Неравномерность технологического, экономического, культурного развития – это следствие наличия положительной обратной связи в социальных процессах. Она приводит к появлению стран-лидеров и стран-аутсайдеров, которые временно отстали в освоении новых ресурсов и ниш и оказались в роли догоняющих. На этом уровне целесообразно агрегированное рассмотрение стран-лидеров,

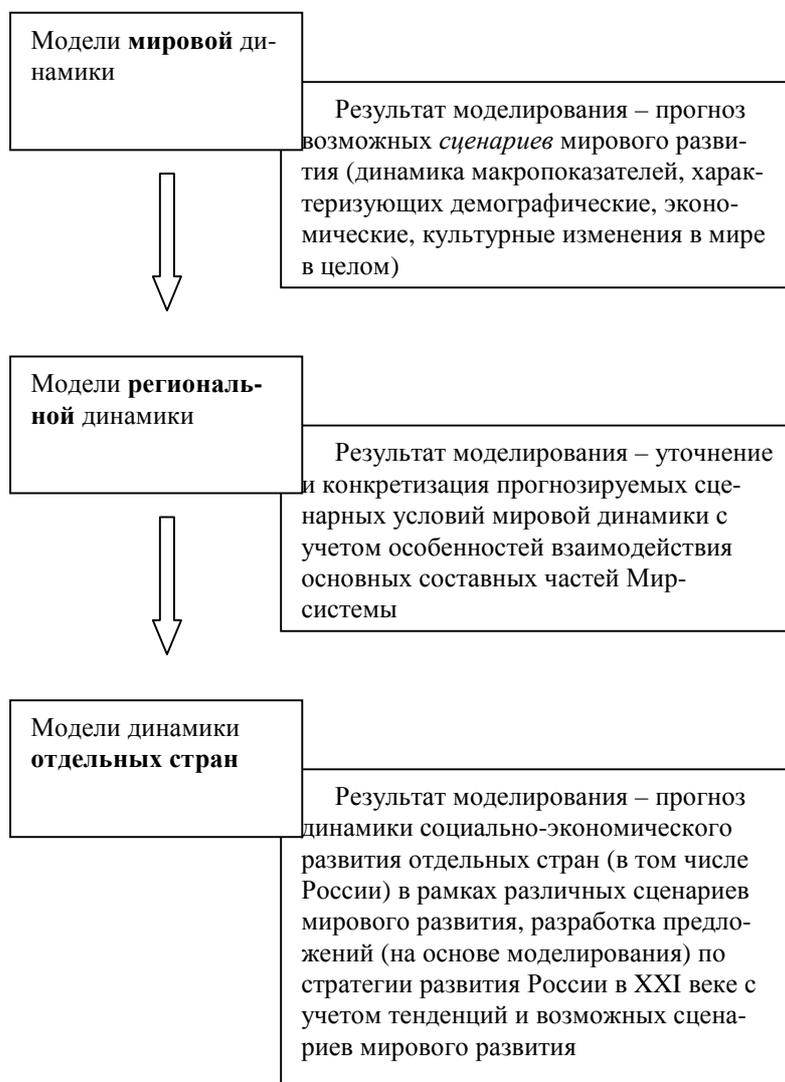
которых можно объединить в кластер с условным названием «Центр» (причем состав стран, входящих в эту группу, изменяется в ходе исторического развития) и временно отставших стран, которых можно объединить в кластер с условным названием «Периферия» (Мир-Системы). Могут использоваться и другие способы агрегирования, например, по территориальному признаку. На этом уровне моделирования ярко проявляются циклические составляющие мировой динамики, связанные с конкуренцией стран и их объединений (экономических, военно-политических союзов) за лидерство, здесь становится важным описание деталей происходящих глобальных процессов.

Результаты исследования макропроцессов на первом и втором уровнях моделирования задают внешние условия и ограничения для моделирования на третьем уровне – уровне отдельных стран;

3) третий уровень моделирования – модели отдельных стран, предназначенные для анализа и прогноза развития конкретных государств в условиях ограничений и сценариев, сформированных на первом и втором уровнях моделирования. На этом уровне могут использоваться разнообразные модели, ориентированные на решение конкретных задач. В частности, в рамках подпрограммы «Комплексный системный анализ и моделирование мировой динамики» основное внимание уделяется исследованию долгосрочных трендов развития стран БРИК, а также вопросам оптимизации социально-экономической политики России в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе.

На Рис. 2 схематично изображена изложенная трехуровневая система моделирования, предназначенная для того, чтобы, с одной стороны, восходить к описанию долговременных макротенденций мировой динамики, а с другой стороны, спускаться к анализу перспектив развития отдельных стран с учетом складывающихся макротенденций мирового развития.

Рис. 2. Схема трехуровневой системы моделирования «мир – регионы – страны»



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. То есть каждая модель должна иметь возможность «разворачиваться» для решения конкретных частных задач и «сворачиваться» для агрегированного описания макротенденций. Это задает достаточно жесткие требования к структуре моделей, используемым параметрам и переменным, входным и выходным данным. То есть система моделей, несмотря на значительное содержательное различие ее уровней, должна изначально проектироваться как единое целое и иметь структуру, позволяющую достаточно просто переходить с одного уровня на другой.

Соответственно, в моделях третьего уровня должны использоваться наиболее «быстрые» переменные, с помощью которых возможно описание достаточно скоротечных процессов и быстрой реакции рассматриваемой социальной системы на изменение внешних и внутренних условий. При переходе к моделям второго и первого уровней должен осуществляться переход от «быстрых» к «медленным» переменным, описывающим долговременные тенденции развития. По существу, эти переменные должны быть «параметрами порядка» моделей более низкого уровня и представлять собой свертки (агрегаты) показателей этих моделей. Соответственно, количество переменных и параметров моделей по мере восхождения от третьего к первому уровню должно сокращаться, а сами модели должны приобретать все более агрегированный характер.

Ниже изложены базовые модели всех трех уровней иерархической системы моделирования, разработанные в рамках подпрограммы «Комплексный системный анализ и моделирование мировой динамики».

Базовая модель мировой динамики

Данная модель описывает глобальные процессы, имеющие долговременный характер. Соответственно, в ней используются наиболее «медленные» переменные, характеризующие тренды мирового развития. Важной исследовательской задачей на этом уровне моделирования является эндогенизация показателей, агрегировано отражающих динамику наиболее значимых (демографических, экономических, технологических, культурных) аспектов мирового развития. Но прежде нужно выбрать соответствующие показатели, которые обладали бы интегрирующими свойствами и были бы наблюдаемыми и измеримыми на протяжении длительных периодов времени. Такая задача была частично решена в монографии *Законы истории: Математическое моделирование развития Мир-Системы* (Коротаев, Малков, Халтурина 2007), где была предложена система всего лишь из трех дифференци-

альных уравнений, описывающих соответственно демографическую, технологическую и культурную динамику Мир-системы на протяжении последних двух тысячелетий. В модели используются следующие показатели, играющие роль макропеременных:

для описания демографической динамики – численность населения мира N ;

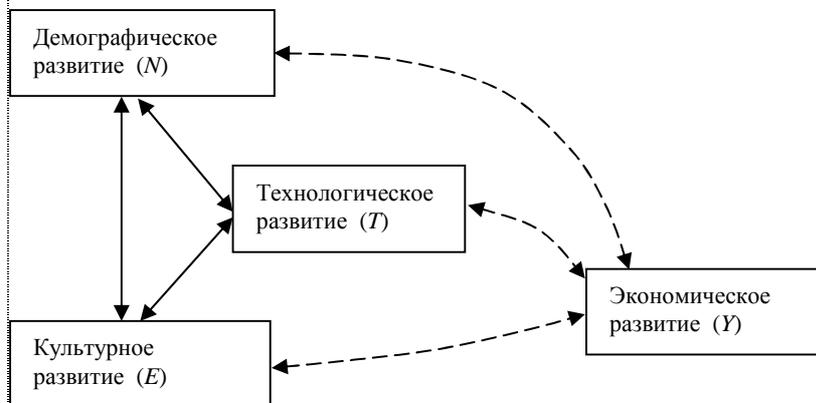
для описания технологического развития – производительность труда T , определяемая как частное от деления величины мирового ВВП Y на количество работников eN (где e – отношение числа работающего населения ко всему населению);

для описания развития культуры – уровень грамотности E , определяемый как отношение числа грамотных ко всему взрослому населению;

для описания развития экономики – величина мирового ВВП Y .

Когнитивная схема базовой модели динамики Мир-системы приведена на Рис. 3:

Рис. 3. Когнитивная схема базовой модели динамики Мир-Системы



В обобщенном виде система уравнений имеет вид:

$$\text{Демография} \quad \frac{dN}{dt} = f_N(N, T, E) \quad (1)$$

$$\text{Технологии} \quad \frac{dT}{dt} = f_T(N, T, E) \quad (2)$$

$$\text{Культура} \quad \frac{dE}{dt} = f_E(N, T, E) \quad (3)$$

$$\text{Экономика} \quad Y = f_Y(N, T, E) \quad (4)$$

В модели считается, что фундаментальными процессами, определяющими развитие человечества, являются: рост населения Земли N , развитие технологий T и культуры E . Развитие экономики является следствием фундаментальных процессов, соответственно, величина мирового ВВП Y является функцией фундаментальных переменных N , T и E .

Предшествующие исследования (Коротаев, Малков, Халтурина 2005, 2007) показали, что с начала нашей эры до второй половины XX века мировая динамика с высокой точностью описывается системой уравнений (1) – (4), в которых функции в правых частях уравнений имеют вид:

$$f_N(N, T, E) = aNT(1-E), \quad (5)$$

$$f_T(N, T, E) = bNT, \quad (6)$$

$$f_E(N, T, E) = cTE(1-E), \quad (7)$$

$$f_Y(N, T, E) = eNT, \quad (8)$$

где a , b , c – структурные коэффициенты, определяемые по историческим данным.

Выражение (5) отражает следующую закономерность: динамика численности населения Земли вплоть до второй половины XX века определялась уровнем экономического развития $Y = NT$, то есть способностью обеспечивать увеличивающемуся населению необходимый уровень потребления. При этом темпы прироста населения снижаются при достижении достаточно высокого уровня образованности (об этом феномене см.: Коротаев, Малков, Халтурина 2005, 2007).

Выражение (6) соответствует формуле Кузнеца – Кремера (Kremer 1993), смысл которой в том, что удельные темпы технологического развития пропорциональны численности изобретателей, которые в свою очередь составляют определенную (и достаточно постоянную) часть населения N .

Смысл выражения (7) в том, что технологическое развитие общества способствует увеличению удельных темпов роста грамотности, но при этом уровень грамотности не может превышать 100% и со временем выходит на насыщение (грамотность взрослого населения становится всеобщей).

Выражение (8) по существу следует из определения мирового валового продукта: его объем Y равен производительности труда T , умноженной на число трудящихся (пропорциональное численности населения N).

Базовая модель (1) – (4) с правыми частями (5) – (8) имеет вид:

$$\frac{dN}{dt} = aTN(1-E), \quad (9)$$

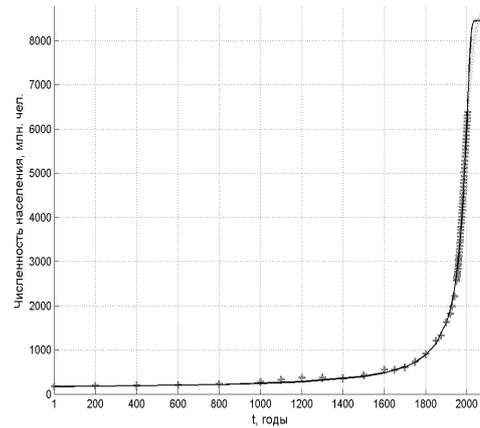
$$\frac{dT}{dt} = bTE, \quad (10)$$

$$\frac{dE}{dt} = cTE(1 - E), \quad (11)$$

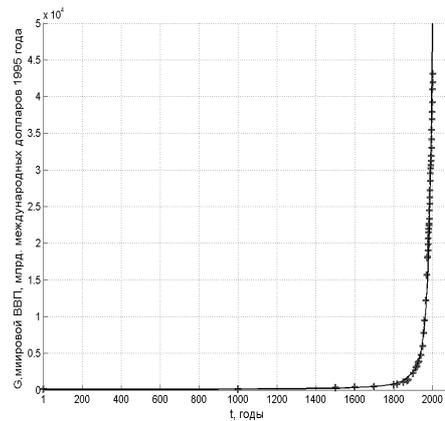
$$Y = eTN. \quad (12)$$

Результаты расчетов, выполненных в предыдущих работах (Коротаев, Малков, Халтурина 2005, 2007) с использованием системы (9) – (12) приведены на Рис. 4:

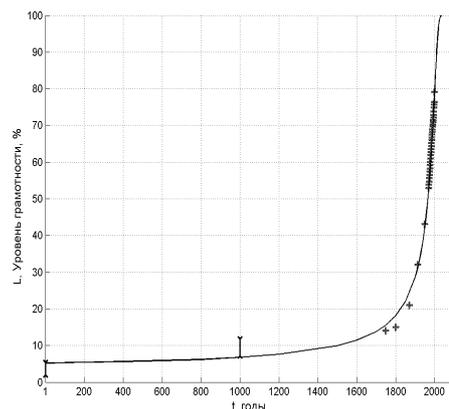
Рис. 4. Сравнение результатов расчетов мировой динамики по модели (9) – (12) (сплошная линия) с историческими данными (крестики): а) – численность населения N , б) – мировой ВВП Y , в) – уровень грамотности E .



а)



б)



в)

Видно очень хорошее соответствие результатов моделирования реальным данным. При этом поражает тот факт, что в течение двух тысячелетий значения структурных коэффициентов a , b , c , e остаются постоянными, что указывает на стабильность макротенденций динамики показателей N , T и E на протяжении столь продолжительного периода времени, охватывающего эпоху аграрного и индустриального развития Мир-системы.

Модель (1) – (4) с правыми частями вида (5) – (8) описывает динамику N , T , E и Y в предыдущую эпоху. Для того, чтобы модель могла быть использована как инструмент прогноза и анализа последствий принимаемых решений, она должна содержать параметры, изменение которых определяет характер траекторий исторического развития. Такими параметрами являются структурные коэффициенты a , b , c , e . Управление их значениями может осуществляться, например, посредством целенаправленного изменения доли конечного потребления в ВВП, путем увеличения инвестиций в технологическое развитие и образование и т.п. Если коэффициентами s_N , s_T , s_E обозначить долю в ВВП Y соответственно потребления, инвестиций в повышение производительности труда и в образование, то с учетом $Y \sim NT$, система уравнений (9) – (12) преобразуется к виду:

$$\frac{dN}{dt} = k_N s_N \frac{Y}{N} N(1 - E), \quad (13)$$

$$\frac{dT}{dt} = k_T s_T Y, \quad (14)$$

$$\frac{dE}{dt} = k_E s_E \frac{Y}{N} E(1 - E), \quad (15)$$

$$Y = eTN, \quad (16)$$

где k_N – обобщенный параметр демографического роста, k_T и k_E – отдача от инвестиций в технологии и в образование. Видно, что (9) – (12) переходит в (13) – (16) путем замены $k_N s_N = a$, $k_T s_T = b$, $k_E s_E = c$ без изменения структуры уравнений.

Структурное соответствие прогнозной модели (13) – (16) с ретроспективной моделью (9) – (12), верифицированной на обширном объеме исторических данных, делает возможным ее использование для краткосрочного и среднесрочного прогноза мирового развития. Однако если речь идет о долгосрочном прогнозе, то модель следует уточнить.

С чем связана необходимость модификации модели, столь хорошо описывавшей динамику Мир-системы до настоящего времени? Это связано с переломным характером современного исторического периода. Предшествующая эпоха гиперболического роста должна была неизбежно закончиться, и это происходит именно сейчас на наших глазах. Изменение характера мирового развития выражается:

- 1) в начавшемся глобальном демографическом переходе (в резком замедлении роста населения Земли; в переходе демографической кривой с гиперболической траектории, длившейся тысячелетия, на логистическую траекторию [Капица 1999; Коротаев, Малков, Халтурина 2005, 2007]);

- 2) в усиливающихся экологических и ресурсных ограничениях, с которыми сталкивается человечество в глобальном масштабе и которые все сильнее влияют на мировое экономическое развитие;

- 3) в переходе от индустриальной к постиндустриальной фазе развития человеческого общества, к экономике знаний.

Эти обстоятельства могут быть учтены в модели путем модификации уравнения (13). В нем коэффициент k_N преобразуется в функцию, зависящую от ресурсных и экологических ограничений, которые ранее были мало значимы (в силу чего значение k_N можно было считать постоянным). Возможный вариант изменения уравнения (13), учитывающий ресурсные и экологические ограничения, предложен в *Главе 1* данной монографии.

Третье из указанных обстоятельств может быть учтено путем изменения уравнения (14) и способа измерения переменной E . Дело в том, что переменная E по своей сути характеризует долю населения, имеющего образовательный и культурный уровень, достаточный для освоения и практического использования передовых для своей эпохи технологий. В аграрную и даже в индустриальную эпохи для этого достаточно было иметь начальное образование, поэтому величина уровня грамотности хорошо выполняла функцию числового показателя для переменной E в ретроспективной модели (9) – (12). В прогнозной модели (13) – (16) уровень грамотности уже не может характеризовать величину E : для освоения передовых технологий требуется высшее образование, соответствующий уровень культуры, то, что сейчас называется «человеческим капиталом». В связи с этим способ измерения E

должен быть изменен, возможный вариант такого изменения предложен в следующей главе данной монографии (см. ниже *Главу 11*).

Аналогичным образом обстоит дело с уравнением (14), которое в ретроспективной модели записано в форме, предложенной Кремером (Kremer 1993). Такая форма записи предполагает, что темп развития технологий пропорционален количеству изобретателей, доля которых в численности населения N считается достаточно стабильной. В постиндустриальную эпоху количество изобретателей – изменяемая величина, причем изменяемая целенаправленно и зависящая от политики государств в научно-технической сфере, от объемов финансирования НИОКР и т.п. Таким образом, количество изобретателей становится управляемым параметром, что должно учитываться в уравнении (14) (возможный вариант соответствующего изменения уравнения (14) приведен в следующей главе данной монографии [см. ниже *Главу 11*]).

Модель (13) – (16) предназначена для моделирования общих трендов развития. В краткосрочном и среднесрочном периоде важное значение имеет моделирование и прогноз циклических процессов (экономических циклов Кондратьева и Жугляра, политических циклов и др.), периодически приводящих к мировым экономическим и политическим кризисам. Цикличность, как правило, связана с исчерпанием ресурсных ниш, со снижением эффективности используемых технологий, с несовершенством регулирования социально-экономических процессов. Способы учета циклической природы социально-экономических процессов в рамках рассматриваемой парадигмы исследованы в предыдущих работах участников нашего проекта (Акаев 2007; Гринин, Малков, Коротаев 2010а, 2010б).

Базовая модель региональной динамики

Базовая модель региональной динамики относится ко второму уровню иерархической системы моделирования. В соответствии с изложенной выше методологией эта модель должна строиться как конкретизация и детализация базовой модели мировой динамики и должна быть ей структурно подобна. Как уже говорилось, конкретизацию базовой модели мировой динамики целесообразно начинать с рассмотрения взаимодействия стран-лидеров технологического развития и временно отстающих стран, объединенных в два кластера с условным наименованием «Центр» и «Периферия». Принципы построения базовой модели «Центр – Периферия» изложены в предыдущих работах участников нашего проекта (Коротаев, Халтурина 2009; Халтурина, Коротаев 2010; Малков и др. 2010; Малков, Коротаев, Божевольнов 2010; Коротаев и др. 2010: Главы 1–2). Когнитивная схема модели приведена на Рис. 5:

Рис. 5. Когнитивная схема базовой региональной модели «Центр – Периферия»

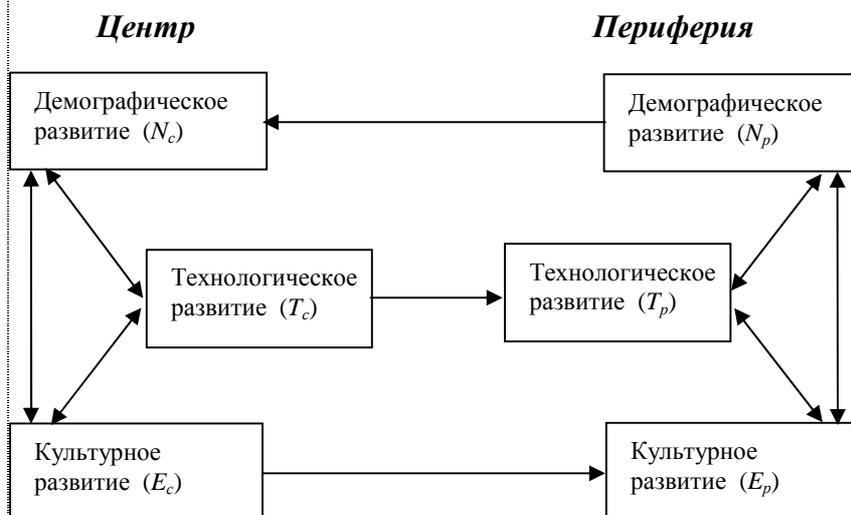


Схема структурно аналогична схеме на Рис. 1 и дополнительно отражает наиболее важные связи между кластерами «Центр» и «Периферия». В рамках рассматриваемого приближения этими связями являются:

в демографической сфере – миграция дешевой рабочей силы из стран Периферии в страны Центра. Это касается как низкоквалифицированных рабочих, так и высококвалифицированных работников (так называемая «утечка мозгов»);

в сфере технологий – постепенный переток новых технологий, создаваемых в странах Центра, в страны Периферии (путем продажи-покупки патентов и лицензий, за счет перевода массового производства из стран Центра в страны Периферии и т.п.);

в сфере культуры и образования – постепенное освоение достижений науки и образования стран Центра странами Периферии.

В обобщенном виде базовая модель региональной динамики может быть представлена следующей системой уравнений:

Центр	Периферия	
$\frac{dN_c}{dt} = a_c T_c N_c (1 - E_c) + a' N_p C_N,$	$\frac{dN_p}{dt} = a_p T_p N_p (1 - E_p) - a' N_p C_N,$	(17)
$\frac{dT_c}{dt} = b_c T_c E_c,$	$\frac{dT_p}{dt} = b_p T_p E_p + b' T_c C_T,$	(18)
$\frac{dE_c}{dt} = c_c T_c E_c (1 - E_c),$	$\frac{dE_p}{dt} = c_p T_p E_p (1 - E_p) + c' E_c C_E,$	(19)
$Y_c = T_c e_c N_c,$	$Y_p = T_p e_p N_p,$	(20)

где N – численность населения; T – уровень технологий; E – образованность; Y – региональный ВВП; a, b, c, a', b', c' – структурные коэффициенты; $C_i = C_i(T, E, Y)$ – функция связи в i -ой сфере; e – доля работающих в населении; индекс c показывает, что соответствующая величина характеризует «Центр»; индекс p показывает, что соответствующая величина характеризует «Периферию».

Видно, что структура уравнений и для «Центра» и для «Периферии» повторяет структуру базовой модели мировой динамики (9) – (12). Отличие в том, что:

в правые части уравнений добавлены члены, описывающие взаимодействие подсистем и содержащие функции связи C_N, C_T, C_E , определяемые на основе эмпирических данных;

в правые части уравнений (18) и для «Центра» и для «Периферии» входит комбинация переменных TE , а не TN , как в соответствующем уравнении мировой динамики (10). Это связано с тем, что доли изобретателей в странах – технологических лидерах и в странах – технологических аутсайдерах существенно отличаются, что лучше учитывается произведениями $T_p E_p$ и $T_c E_c$ (поскольку средний уровень образования E коррелирует с количеством людей, занимающихся наукой и развитием технологий).

Особенность учета взаимодействия «Центра» и «Периферии» заключается в том, что уравнения (17), отражающие процессы миграции рабочей силы, обладают свойством непрерывности (сколько мигрантов убывает из стран Периферии, столько же их прибывает в страны Центра); в то время как процесс перетока технологий и образования из «Центра» в «Периферию» происходит без снижения уровня T и E в странах Центра.

Модель (17) – (18) предназначена для моделирования трендов развития, предварительные результаты расчетов по модели представлены в предыдущих работах участников нашего проекта (Малков, Коротаев, Божевольнов 2010; Коротаев и др. 2010). На региональном уровне ярко проявляются циклические процессы в экономической и политической сферах как результат

конкуренции мировых подсистем. Исследования в области моделирования конкурентных взаимодействий проведены в *Главе 9* настоящей монографии.

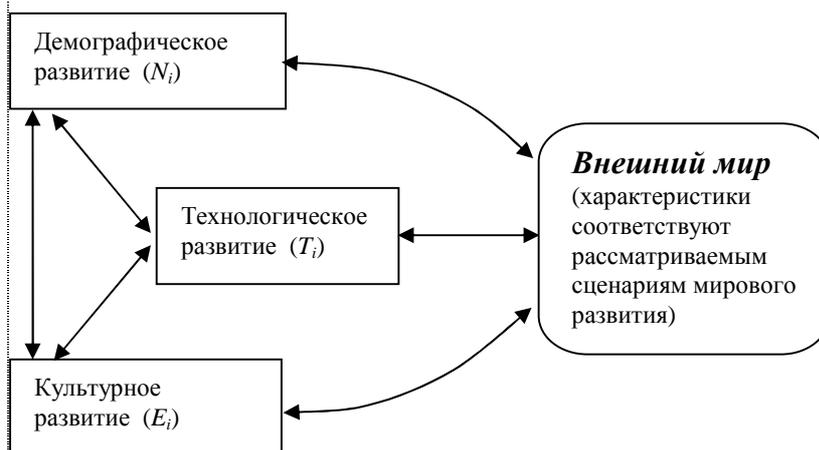
Моделирование динамики отдельных стран

Моделирование социально-экономической и политической динамики отдельных стран относится к третьему уровню рассматриваемой иерархической системы моделирования. Соответствующие модели могут иметь разный вид и структуру в зависимости от решаемых задач. Мы рассмотрим два типа моделей: агрегированные модели долгосрочной динамики, предназначенные для прогноза трендов развития крупных стран, и более детальные модели социально-экономических процессов, предназначенные для решения оптимизационных задач в интересах разработки и обоснования государственной социально-экономической политики.

Базовая модель долгосрочной динамики крупных стран

Агрегированные модели долгосрочной динамики крупных стран, имеющих обширный внутренний рынок и достаточно развитую экономику, могут быть построены по типу базовой модели (1) – (4). Когнитивная схема такой модели представлена на Рис. 6:

Рис. 6. Когнитивная схема агрегированной модели долгосрочной динамики крупной страны



Достоинством такого построения модели является то, что она структурно подобна базовым моделям мировой и региональной динамики и поэтому может легко сочетаться с ними. Уравнения такой модели логично записать в виде:

$$\frac{dn_{ik}}{dt} = D_{ik}(t), \quad N_i(t) = \sum_k n_{ik}(t), \quad (21)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = b_i T_i E_i + b'_i C_{Ti}, \quad (22)$$

$$\frac{dE_i}{dt} = c_i T_i E_i (1 - E_i) + c'_i C_{Ei}, \quad (23)$$

$$Y_i = T_i e_i N_i, \quad (24)$$

где N_i – численность населения; T_i – уровень технологий; E_i – образованность; Y_i – ВВП i -ой страны; n_{ik} – численность отдельных половозрастных групп населения; $D_{ik}(t)$ – демографическая функция, описывающая динамику различных групп населения; $a_i, b_i, c_i, b'_i, c'_i$ – структурные коэффициенты; $C_i = C_i(T, E, Y)$ – функция связи (отражает взаимодействие с внешним миром); e_i – доля работающих в населении страны.

Детализация модели выражается в более конкретном описании демографических процессов с учетом динамики половозрастных групп, а также в более детальном описании функций связи $C_i(T, E, Y)$ на основе имеющихся статистических данных.

Значения структурных коэффициентов $a_i, b_i, c_i, b'_i, c'_i$ определяются путем настройки модели методом наименьших квадратов по рядам исторических данных. Данные значения коэффициентов без изменения могут быть использованы для расчета краткосрочного инерционного прогноза. Для анализа других (не инерционных) вариантов развития эти коэффициенты и функция связи C_i при проведении расчетов могут изменяться, отражая рассматриваемые сценарии структурной политики.

Целью прогнозных расчетов является нахождение оптимальных вариантов структурных изменений, определение возможностей и ограничений экономического роста, долгосрочных перспектив развития.

Несмотря на большую детализацию по сравнению с моделью региональной динамики, данная модель остается слишком агрегированной для решения практических оптимизационных задач и может прогнозировать лишь общие тренды для различных сценариев развития. Для решения оптимизационных задач, предназначенных для поддержки принятия практических решений, должны использоваться модели другого типа.

Базовая модель краткосрочной социально-экономической динамики

В моделях этого типа должны использоваться наиболее «быстрые» переменные, с помощью которых возможно описание достаточно скоротечных процессов и быстрой реакции рассматриваемой социальной системы на изменение внешних и внутренних условий.

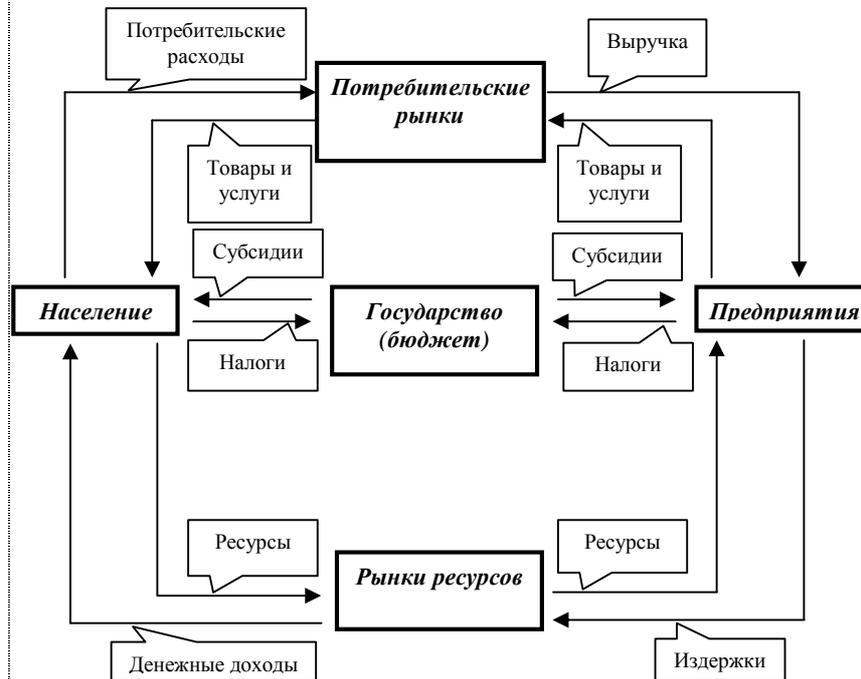
Модель должна:

- описывать динамическую реакцию экономики на изменение внешних и внутренних параметров (изменение курса рубля, тарифов, государственных расходов, объемов экспорта-импорта и т.п.);
- учитывать процессы рыночного ценообразования и инфляционные процессы, что является крайне важным при оценке целесообразности той или иной бюджетной политики;
- учитывать влияние экономической политики на динамику экономической структуры общества (ЭСО) и – в свою очередь – влияние динамики ЭСО на социально-экономические процессы в стране;
- учитывать функционирование отдельных отраслей в составе экономики России;
- иметь прозрачную структуру, оперировать небольшим количеством параметров (с их настройкой по ретропрогнозу).

Пример такой модели, разработанной для условий России, описан в (Чернавский, Старков, Щербаков 2002а, 2002б; Чернавский и др. 2010); обобщенная когнитивная схема модели приведена на рисунке 7.

Модель описывает на макроэкономическом уровне процессы производства, распределения и потребления производимых товаров и услуг, динамику материальных и финансовых потоков, их распределение среди различных социальных слоев населения (что позволяет анализировать социальные последствия проводимой политики). Примеры использования модели приведены в (Чернавский и др. 2010). Модель описывает динамическую реакцию социально-экономической системы на изменение внешних условий и на различные управляющие воздействия (изменение налоговой, тарифной политики, цен на сырье и энергоносители и т.п.) и может служить средством поддержки решений, принимаемых на государственном уровне.

Рис. 7. Когнитивная схема базовой модели социально-экономической динамики РФ



Таким образом, изложенные выше модели в совокупности составляют иерархическую систему, предназначенную для сквозного моделирования в связке «мир-регион-страна» и позволяющего с единых позиций делать макропрогноз мировой динамики, а с другой стороны, осуществлять поиск оптимальных стратегий развития РФ с учетом глобальных тенденций и ограничений. Представляется, что предлагаемый подход позволит сделать новый шаг в совершенствовании методологии и практики моделирования и прогнозирования мировой динамики.

Библиография

Акаев А. А. 2007. Вывод общего уравнения макроэкономической динамики, описывающего совместное взаимодействие долгосрочного роста и деловых циклов. Доклады РАН 417/4: 439–441.

- Гринин Л. Е., Малков С. Ю., Коротаев А. В. 2010а.** Математическая модель среднесрочного экономического цикла. *Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики* / Ред. А. А. Акаев, А. В. Коротаев, Г. Г. Малинецкий. М.: ЛКИ/URSS. С. 5–69. С. 292–304.
- Гринин Л. Е., Малков С. Ю., Коротаев А. В. 2010б.** Математическая модель среднесрочного экономического цикла и современный глобальный кризис. *История и Математика: Эволюционная историческая макродинамика* / Ред. С. Ю. Малков, Л. Е. Гринин, А. В. Коротаев. М.: Либроком/URSS. С. 233–284.
- Дадаян В. С. 1984. (Ред.).** *Моделирование глобальных экономических процессов.* М.: Экономика.
- Капица С. П. 1999.** *Сколько людей жило, живет и будет жить на Земле. Очерк теории роста человечества.* М.: Наука.
- Коротаев А. В., Малков А. С., Халтурина Д. А. 2005.** *Законы истории: Математическое моделирование исторических макропроцессов. Демография. Экономика. Войны.* М.: КомКнига/URSS.
- Коротаев А. В., Малков А. С., Халтурина Д. А. 2007.** *Законы истории: Математическое моделирование развития Мир-Системы. Демография, экономика, культура.* М.: КомКнига/URSS.
- Коротаев А. В., Халтурина Д. А. 2009.** *Современные тенденции мирового развития.* М.: ЛИБРОКОМ/URSS.
- Коротаев А. В., Халтурина Д. А., Малков А. С., Божевольнов Ю. В., Кобзева С. В., Зинькина Ю. В. 2010.** *Законы истории. Математическое моделирование и прогнозирование мирового и регионального развития.* Изд. 3-е, испр. и доп. М.: ЛКИ/URSS.
- Малков А. С., Божевольнов Ю. В., Халтурина Д. А., Коротаев А. В. 2010.** К системному анализу мировой динамики: взаимодействие центра и периферии Мир-Системы. *Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики* / Ред. А. А. Акаев, А. В. Коротаев, Г. Г. Малинецкий. М.: ЛКИ/URSS. С. 234–248.
- Малков А. С., Коротаев А. В., Божевольнов Ю. В. 2010.** Математическое моделирование взаимодействия центра и периферии Мир-Системы. *Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики* / Ред. А. А. Акаев, А. В. Коротаев, Г. Г. Малинецкий. М.: ЛКИ/URSS. С. 277–286.
- Халтурина Д. А., Коротаев А. В. 2010.** Системный мониторинг глобального и регионального развития. *Системный мониторинг: Глобальное и региональное развитие* / Ред. Д. А. Халтурина, А. В. Коротаев. М.: Либроком/URSS. С. 11–188.
- Чернавский Д. С., Старков Н. И., Малков С. Ю., Коссе Ю. В., Щербаков А. В. 2010.** Модель макроэкономической динамики современной России. *Стратегическая стабильность 1/50: 2–19.*
- Чернавский Д. С., Старков Н. И., Щербаков А. В. 2002а.** Динамическая модель поведения общества. Синергетический подход к экономике. *Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие.* М.: Наука. С. 239–291.
- Чернавский Д. С., Старков Н. И., Щербаков А. В. 2002б.** О проблемах физической экономики. *Успехи физических наук* 172: 1045–1066.
- Kremer M. 1993.** Population Growth and Technological change: One Million B.C. to 1990. *The Quarterly Journal of Economics* 108/3: 684–716.