

АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОТРАСЛЕВОЙ ЭВОЛЮЦИИ: УГОЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ РОССИИ

Л.С. Марков, В.М. Маркова

ИЭОПП СО РАН

Д.Д. Котёлкин

*Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского
гуманитарного научного фонда (проект № 12-12-54004)*

Аннотация

Обосновывается актуальность эволюционного подхода к изучению развития экономических систем. Осуществлена структуризация производства энергетических углей России как системы взаимодействующих агентов, разработана агент-ориентированная модель отрасли. Показана пригодность объяснения отраслевой динамики с позиций конкуренции между образующими экономическую систему агентами. Продемонстрирована возможность изучения при помощи агент-ориентированного моделирования «альтернативной» истории отрасли.

Ключевые слова: эволюционная экономика, агент-ориентированное моделирование, производство энергетических углей

Abstract

The paper proves an urgency of applying an evolutionary approach to study how economic systems progress, and it presents the structure of the Russian

steam coal facilities considered as a system of interacting agents and described by an agent-based model developed by the author. The model, in the authors' opinion, could be regarded quite applicable to analyze the industry dynamics as well as an «alternative history» of the industry in terms of competition between agents of the economic system.

Keywords: evolutionary economics, agent-based modeling, steam coal production

АКТУАЛЬНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОДХОДА

Постоянное усложнение картины окружающего мира, в том числе его социально-экономической подсистемы, сопровождаемое бурным развитием компьютерных технологий, привело к появлению направления экономической науки, по аналогии с биологией получившего название эволюционного, а в силу схожести с другими естественными науками, прежде всего с физикой, именуемого физической (Д.С. Чернавский с соавторами [1]) и синергетической (В.Б. Занг [2]) экономикой.

Возникновение эволюционной парадигмы в экономике в немалой степени обусловлено ограниченностью традиционных подходов, мало пригодных к изучению неравновесных состояний экономических систем, а также игнорирующих их контринтуитивный характер, формируемый взаимодействиями и обратными связями между ограниченно рациональными агентами. Как отмечает С.В. Кюнтцель, «эволюционный подход в экономике можно рассматривать как методологическую альтернативу неоклассическому подходу. В фокусе анализа находятся неравновесные процессы, а экономика рассматривается как система, которая постоянно претерпевает изменения различного характера» [3, с. 3].

Основоположниками эволюционной экономической теории считаются Т. Мальтус, Й. Шумпетер, Ф. Хайек, А. Алчиан. До уровня единой методологии эволюционный подход был обобщен Р. Нельсоном и С. Винтером [4]. Традиционно в рамках эволюционного подхода выделяются макро- и микроэкономические направления, модельно-методологические основы которых лежат в областях системной динамики и агент-ориентированного моделирования (АОМ) соответственно. Оба направления базируются на имитационном компьютерном моделировании и обязаны своим появлением развитию вычислительной техники.

Как отмечает Ю.Г. Карпов [5], в рамках системно-динамического подхода система рассматривается на самом высоком уровне агрегации, при этом исследователи абстрагируются от единичных событий. Причинно-следственные зависимости параметров и характеристик системы являются основным средством отображения структуры и функционирования систем. Дифференциальные уравнения описывают законы функционирования интегрально, агрегированно, как законы изменения взаимозависимых потоков вещества, денег, заказов, людей. На системно-динамическом подходе основываются работы В.М. Полтеровича и Г.М. Хенкина [6], В. Маевского [7], Дж. Силверберга (G. Silverberg) и Б. Верспэйджена (B. Verspagen) [8], К. Иваи (K. Iwai) [9] и др.

Агент-ориентированное моделирование, напротив, базируется на представлении единичных объектов системы, каждый из которых имеет свое поведение и свои параметры, на учете единичных событий и реакций на них конкретных активных объектов. Глобальные законы поведения коллектива агентов выводятся как интегральные характеристики поведения и взаимодействий отдельных агентов. В.И. Суслов отмечает, что «АОМ – специальный класс вычислимых моделей... Основная идея данного подхода – построение вычислительного инструмента, представляющего собой множество агентов с набором свойств и правил поведения. ... В результате принципиально меняется взаимоотношение между микро- и макроэкономикой. Теперь это не две разные, мало связанные между собой теоретические дисциплины. Закономерности и связи на макроуровне оказываются порожденными процессами, происходящими на микроуровне» [10, с. 16]. В.Л. Тамбовцев считает, что «агент-ориентированное моделирование (АОМ) уже способно стать мощным средством экономического анализа, соответствующим природе экономики как рефлексивной системы» [11, с. 51].

Агентный подход используется для изучения и моделирования отраслевой эволюции [4, 12–14], макроэкономических характеристик [15–17], поведения на рынке труда [18, 19], экономического роста [4, 20]. Обзор различных моделей можно посмотреть в работах [8, 16, 19, 20–23].

Большинство существующих агент-ориентированных моделей проверяют теоретические гипотезы на условных примерах, и лишь не-

большая часть из них имеет прикладной характер, используется для изучения реальных экономических процессов на макро- и микроуровне, для построения прогнозов. Данная проблема особенно характерна для отечественных исследований. В этой связи интерес представляет группа моделей, именуемая «модели, согласующиеся с историей» (history-friendly models, HFM). HFM направлены на изучение гипотез о механизмах и факторах, влияющих на отраслевую динамику, технологический прогресс, институциональные изменения, структуру спроса.

Как подвид агент-ориентированных моделей HFM рассматривались в работах Ф. Малербы (F. Malerba) с соавторами [13, 14]. Пригодность HFM в качестве инструмента, объясняющего отраслевую эволюцию, показана для компьютерной [12, 14] и фармацевтической [24] отраслей, для производства оперативной памяти и жидкокристаллических мониторов [12].

HFM включают в себя три шага:

- 1) описание эволюции экономической системы (отрасли) на основе наблюдаемых фактов и оценочных предположений;
- 2) построение модели, воспроизводящей историю при определенном наборе параметров;
- 3) получение базовой (приемлемой) исторической траектории и моделирование гипотетических ситуаций, расходящихся с фактической историей объекта.

Мы предприняли попытку создания такой модели применительно к отрасли производства энергетических углей. Данная статья фокусируется преимущественно на втором шаге – на построении модели и проверке ее адекватности.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОБЪЕКТА И ЕГО СТРУКТУРИЗАЦИЯ

Рынок энергетического угля характеризуется, во-первых, простой производственной цепочки (только 25–30% добываемого угля подвергаются дальнейшим технологическим переделам); во-вторых, однородностью продукции, проявляющейся в том числе и во взаимо-

заменяемости различных марок углей; в-третьих, высокой вариативностью участников сделок купли-продажи угля – предприятий отрасли и потребителей энергетического угля, «взаимозаменяемостью» производителей.

Перечисленные аспекты позволяют сформулировать предположение о горизонтальном характере системы и о конкуренции на рынке продукции как движущей силе структурных трансформаций российской отрасли производства энергетических углей. Мы полагаем, что предприятия конкурируют посредством своей производительности: более эффективные компании наращивают мощности и объемы производства, менее эффективные сокращают производство.

Наша основная задача заключается в поиске ответа на вопрос о том, возможно ли достаточно точное прогнозирование отраслевой динамики исходя из знания: а) текущих технологико-экономических характеристик предприятий; б) прогнозных оценок функции спроса на продукцию отрасли; в) правил поведения агентов, определяемых посредством конкуренции их сравнительных производительностей. Для ответа на поставленный вопрос мы мысленно перемещаем «объект прогнозирования» в 2005 г. и на основании вышеприведенной информации пытаемся воспроизвести эволюцию отрасли. В качестве источников информации использовались данные Росинформугля, ЦДУ ТЭК, Госкомстата [25–27].

Построенная нами модель предполагает описание динамики производства энергетического угля на уровне отдельного агента и популяции в целом. Соответственно, адекватность эволюционного моделирования будет оцениваться на основании близости фактических и модельных характеристик: динамики совокупных и частных объемов производства. Для моделирования системы первым делом необходимо определить агентов и их взаимосвязи.

Агенты. В течение 2000-х годов в угольном комплексе России сформировались относительно устойчивые интегрированные структуры. Несмотря на то что добычу энергетического угля в стране осуществляют около 190 предприятий, более двух третей из них контролируются холдингами. На долю наиболее крупных холдингов (ОАО «СУЭК» и ОАО «УК «Кузбассразрезуголь») приходится более поло-

вины производства энергетических углей. Важно отметить межрегиональный характер холдинговых структур. Например, СУЭК интегрирует предприятия восьми регионов, шесть из которых – сибирские территории. При этом различные региональные подразделения одного холдинга ведут независимую политику и фактически конкурируют между собой.

В целях моделирования 187 угольных предприятий России были агрегированы в 34 агента (табл. 1). Основным критерием для выделения агентов выступала близость характеристик производительности (переменных издержек и фондоемкости продукции) образующих их предприятий. Другими критериями для объединения предприятий в некоторый агент или, напротив, для их разбиения помимо технологических различий служили способ добычи, холдинговая и территориальная принадлежность. Большая часть выделенных агентов сформированы исходя из территориальной и холдинговой принадлежности угледобывающих предприятий. При этом некоторые холдинги зарегистрированы не только по территориальному, но и по технологическому признаку, связанному, например, с различными способами добычи или с типом (качеством) угля. Скажем, СУЭК – 11-й и 12-й агенты, УГМК – 13-й и 14-й агенты. В других случаях, напротив, региональные подразделения одного холдинга, осуществляющие добычу различными способами, рассматривались как единый агент. Некоторые мелкие технологически близкие компании – поставщики угля, располагающиеся в одном регионе, представлены как единый элемент системы – агент модели. Таким агентом являются предприятия Дальнего Востока (34-й агент). Несколько агентов модели, один из которых сибирский, представляют собой объединения различных не только по аффилированности, но и по территориальной принадлежности предприятий, как правило, ведущих деятельность в географически соседствующих регионах. Основанием для агрегированного рассмотрения в таких случаях являлась близость производительностей и технологий предприятий, а также их относительно небольшие размеры. Это, например, 30-й и 31-й агенты – предприятия СУЭК в Забайкальском крае и Республике Бурятия.

Таблица 1

Характеристики агентов модели

Угольное объединение	Регион	Вид/марка угля	Способ добычи	Кол-во предприятий
Прочие предприятия	Респ. Коми, Мурманская обл.	Каменный Г	Шахты	3
Прочие предприятия	Ростовская обл., Московская обл.	Антрацит	Шахты	18
Прочие предприятия	Свердловская обл., Челябинская обл., Оренбургская обл.	Бурый	Разрезы	5
«Сибантрацит»	Новосибирская обл.	Антрацит	Разрезы	2
«Evraz Group»	Кемеровская обл.	Каменный Г, Д	Шахты	3
Группа «Донецк-сталь»		Каменный Г, Д	Шахты	3
«Русский уголь»		Каменный Д	Разрезы	3
СДС		Каменный Г, ДГ	Шахты	2
СДС		Каменный СС	Разрезы	4
«Сибуглемет»		Каменный Г, ЖО	Разрезы	2
СУЭК		Каменный Г, ДГ	Шахты	10
СУЭК		Каменный Д	Разрезы	3
УГМК		Каменный Д, ДГ	Разрезы	9
УГМК		Каменный СС	Разрезы	6
Талдинская УК		Каменный СС, Г	Шахты, разрезы	2
ЮКАС-Холдинг		Каменный Г, СС, Д	Разрезы	4
Инвестиционная СТК		Каменный Д	Шахты, разрезы	2
ТалГЭК		Каменный Д	Разрезы, шахты	2
«Промуглесбыт»		Каменный ДГ, Д	Разрезы, шахты	2

Окончание табл. 1

Угольное объединение	Регион	Вид/марка угля	Способ добычи	Кол-во предприятий
Кузбасская ТК	Кемеровская обл.	Каменный, Д	Разрезы	2
ММК		Каменный Д	Шахты	2
«Мечел»		Каменный Т	Разрезы	2
Прочие шахты		Каменный Т, Г, Д	Шахты	6
Прочие разрезы		Каменный Т, Г, Д	Разрезы	11
СУЭК	Красноярский край	Бурый	Разрезы	3
Прочие предприятия		Бурый	Разрезы	19
EN+	Иркутская обл., Респ. Тыва	Каменный Д, Г	Разрезы	3
EN+		Бурый	Разрезы	1
СУЭК	Респ. Хакасия	Каменный Д, Г	Разрезы	4
СУЭК	Забайкальский край, Респ. Бурятия	Каменный Д	Разрезы	3
СУЭК		Бурый	Разрезы	2
Прочие предприятия	Иркутская обл., Респ. Хакасия, Забайкальский край	Бурый/каменный Д	Разрезы	11
СУЭК	Приморский край, Хабаровский край	Бурый	Разрезы, шахты	6
Прочие предприятия	Дальний Восток (прочие регионы)	Бурый/каменный Д	Разрезы, шахты	29
Всего				187

Поскольку первоочередным объектом нашего интереса являлся сибирский кластер угледобывающих производств, в процессе структуризации более детально определялись агенты, представляющие СФО. Так, из общего числа агентов модели (см. табл. 1) 29 объединили в себе 124 угледобывающих предприятия Сибири. Предприятия других регионов рассматривались более приближенно: 63 компании из этих регионов сформированы в пять агентов. Такой подход к выде-

лению агентов представляется адекватным также и потому, что на долю предприятий отрасли, не расположенных в СФО, приходится относительно небольшой сегмент рынка.

Проведенная группировка российских угледобывающих предприятий нам кажется приемлемой, поскольку отражает возможную институциональную, инновационную или технологическую однородность полученных укрупненных элементов системы, являющуюся следствием общей территориальной, холдинговой и технологической принадлежности рассматриваемых предприятий, что придает модели структурную неперегруженность.

Взаимосвязи. В процессе деятельности независимые друг от друга предприятия угледобывающей отрасли, как правило, редко устанавливают между собой активные взаимосвязи. Периодически наблюдается взаимодействие в рамках холдингов, а также при строительстве инфраструктурных объектов, в рамках услуг по переработке угля на свободных обогатительных мощностях или при использовании свободного вагонного парка. Однако такие взаимодействия не являются регулярными, а потому их стоит рассматривать как излишние усложнения для нашей модели на данном этапе (однако и как потенциальные направления ее дальнейшего развития). Хотя в действительности угледобывающие предприятия также ведут конкурентную борьбу за минерально-сырьевую базу, в целях моделирования будем говорить исключительно о горизонтальном характере взаимодействия компаний в угольной отрасли через их конкуренцию на рынке продукта.

Угледобывающие предприятия осуществляют поставки в рамках как долгосрочных, так и спотовых гибких контрактов, в результате чего они могут достаточно гибко менять структуру продаж в направлении либо экспорта, либо внутреннего рынка в зависимости от того, на каком из направлений сложилась максимальная цена реализации. В силу этого упрощенно рынок потребителей энергетических углей будем рассматривать не только как однородный по продукту, но и как единый по географическому охвату (агрегированно внутренний и внешний).

Итак, в качестве ключевой гипотезы о взаимодействии и взаимосвязанности участников угольного кластера принимается предположение об их конкуренции на рынке конечной продукции. Мы полагаем, что

продуктовая конкуренция, обусловленная соревнованием производителей компаний, служит основным фактором, определяющим развитие кластера угольных производств на среднесрочную перспективу.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

С точки зрения эволюционной теории угольную отрасль можно рассматривать как популяцию гетерогенных экономических агентов, конкурирующих между собой. В основании макроуровня нашей модели лежит предположение, что эндогенно формируемое совокупное предложение на рынке энергетического угля во взаимодействии с экзогенно задаваемой функцией спроса обуславливает тенденцию изменения цены на продукцию в каждый период времени (рис. 1).

Следует отметить отсутствие в настоящее время единой цены на энергетический уголь. Различают цены потребителей и цены поставщиков, внутренние и внешние цены, характеризующиеся высокой изменчивостью. Отсутствие единой цены на уголь обуславливает целесообразность введения в целях моделирования ее гипотетического аналога. Мы предполагаем, что такая гипотетическая единая цена определяется ценой предыдущего периода, скорректированной с учетом текущих спроса и предложения¹. Если текущий спрос превышает предложение, то цена растет, и наоборот (см. рис. 1).

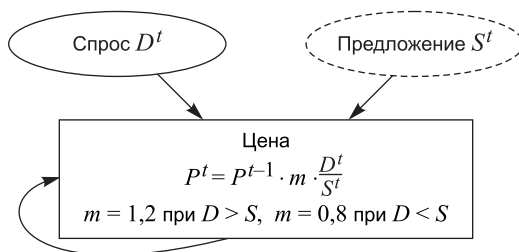


Рис. 1. Макроуровень модели

¹ В начальный момент времени t_0 (2005 г.) единая цена определяется на основе средневзвешенной по объемам производства выделенных агентов отпускной цены (цены производителей) и принимается равной 750 руб./т.

Коэффициент m характеризует эластичность единой цены к соотношению спроса и предложения и является калибровочным. Поскольку согласно заложенным в компьютерную модель ограничениям спрос и предложение не могут различаться кратно (в разы), коэффициент m играет основную роль в изменении цены. Отношение спроса к предложению преимущественно задает направление изменения. Имеющиеся данные об изменчивости внутренних цен производителей, а также существующие оценки индекса цен на энергетический уголь [28–31] позволяют остановиться на предположении, что годовые колебания среднерыночной цены составляют $\pm 20\%$.

Единая цена, наряду с показателями выпуска продукции, участвует в формировании рентабельности агентов, запуская в действие механизм «естественного отбора» в нашей эволюционной модели.

Показатели совокупного предложения отрасли и единой рыночной цены выступают основными эндогенными/расчетными переменными, посредством которых осуществляется взаимная увязка макро- и микроуровневой модели. Совокупное предложение по определению представляет собой суммарный выпуск продукции агентами системы и участвует в формировании модельной единой цены на рынке энергетических углей. Текущая рыночная цена влияет на производительность агентов и, как следствие, на изменение размеров мощностей, на уровень их загрузки и на объем выпуска каждого агента в следующий период.

Объем производства продукции каждым агентом в конкретный момент времени выступает ключевой характеристикой микроуровня системы, основным моделируемым показателем. В дальнейшем на его основании оценивается структурная адекватность модели. Наш агент-ориентированный подход к моделированию предусматривает формирование совокупного предложения снизу, когда агенты опираются на свои предположения о конъюнктуре рынка и на знание собственных производственных возможностей (рис. 2).

Каждый агент на определенном шаге имеет информацию о своих производственных возможностях, о степени их использования и об относительной конкурентоспособности (выраженной в показателе рентабельности продаж), определяющей и изменение количества мощностей, и уровень их загрузки (коэффициент использования мощ-

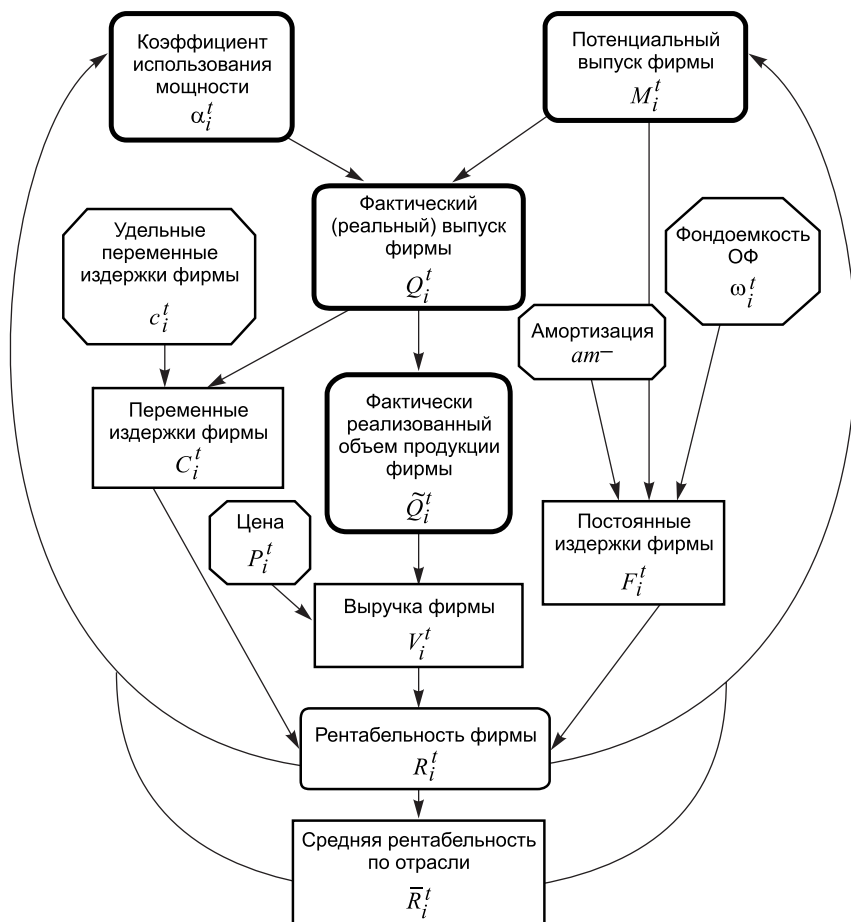


Рис. 2. Микроуровень модели

ностей – КИМ). Также он имеет представление о размере совокупного спроса на продукцию отрасли в предыдущем периоде и о своей доле на рынке. Основываясь на этих данных, компании определяют объем выпуска продукции в текущем периоде.

Фактический объем производства каждого агента – величина расчетная, определяемая производственной мощностью (потенциальный

выпуск) и уровнем ее загрузки: $Q_i^t = \alpha_i^t \cdot M_i^t$ (см. ниже раздел «Правила изменения мощностей и коэффициента использования мощностей»). Объем производства продукции оказывает влияние на величину переменных издержек производства и, как следствие, на эффективность агентов. Другая составляющая издержек – постоянные затраты формируются параметрами фондоемкости продукции² (этот параметр уникален для каждого агента и характеризует его технологию) и нормы амортизации (общий параметр для популяции агентов), а также переменной потенциальной мощности компаний: $F_i^t = M_i^t \cdot \omega_i^t \cdot \alpha_m$.

Однако, стремясь удовлетворить рыночный спрос, агенты действуют в условиях неполноты информации, ориентируясь на показатели рынка прошлых лет (в модели функция спроса задается экзогенно) и демонстрируя так называемое «близорукое» поведение. В связи с этим на каждом шаге возможно возникновение ситуации неверной оценки потенциала рынка и, как следствие, пере- или недопроизводства продукции. Поэтому следует различать объемы произведенной продукции и реализованной. Объем реализованной продукции, в противовес объему производства, участвует в формировании доходной составляющей рентабельности – прибыли и, следовательно, производительности агентов, их текущей конкурентоспособности (см. далее раздел «Правило определения объема реализованной продукции»).

Рентабельность является ключевой составляющей модели микроуровня. В ее расчете прямо или косвенно участвуют все переменные и параметры модели:

$$R_i^t = \frac{W_i^t}{V_i^t} = \frac{(P_i^t \cdot \tilde{Q}_i^t - C_i^t \cdot Q_i^t - F_i^t)}{P_i^t \cdot \tilde{Q}_i^t}.$$

Сравнительная производительность агентов приводит в действие механизмы конкуренции и естественного отбора. Относительный уровень эффективности компаний определяет изменение их производ-

² Показатели удельных переменных издержек, фондоемкости продукции и коэффициента амортизации принимаются на основе фактических данных и предполагаются неизменными при отсутствии инновационного поиска.

ственных мощностей и степень загрузки последних, замыкая логический цикл модели микроуровня.

Правила изменения мощностей и коэффициента использования мощностей. Поведение агентов на каждом шаге обуславливается текущей рыночной конъюнктурой (соотношением спроса и предложения). Если спрос больше предложения, растут мощности и уровень их загрузки (КИМ). Если спрос не превышает предложения, мощности не изменяются, а КИМ снижается. Основанием для изменения этих переменных служит сравнительный уровень рентабельности, демонстрируемый каждым агентом относительно средней эффективности по популяции:

$$\alpha_i^t = \alpha_i^{t-1} \cdot f(R_i^{t-1}; \hat{R}^{t-1});$$

$$M_i^t = M_i^{t-1} \cdot f(R_i^{t-1}; \hat{R}^{t-1}).$$

Агенты в зависимости от показателя рентабельности прошлого периода делятся на три группы: наиболее эффективные, средней эффективности, сравнительно неэффективные. Каждой группе после изучения реальных производственных характеристик угледобывающих компаний устанавливаются свои диапазоны изменения переменных. На основании анализа фактических данных по компаниям угольной отрасли и калибровки модели³ были сформированы правила увеличения мощностей агентов и коэффициента их загрузки (табл. 2).

При благоприятной рыночной конъюнктуре фирмы выбирают одну из двух стратегий поведения: изменение коэффициента использования мощности или наращивание самой мощности (рис. 3).

Если КИМ по итогам прошлого периода составил более 96%, то агент в обязательном порядке увеличивает свои мощности⁴. При этом фирмы всех групп увеличивают мощность на 4–6% за шаг модели,

³ Калибровка модели осуществлялась посредством подбора изменения мощностей и КИМ в заранее эмпирически определенном интервале. При этом адекватность модели отслеживалась исходя из совокупных показателей мощностей и объемов производства по отрасли, а также темпов изменения мощностей и КИМ.

⁴ Агенты в модели аккумулируют прибыль в фонде накопления, который в дальнейшем может быть использован для расширения мощностей и покрытия

Правила определения загрузки и прироста мощностей

Правило	Спрос больше предложения, $D^{t-1} > S^{t-1}$	Предложение больше спроса, $S^{t-1} > D^{t-1}$
Загрузки мощности	$k = D^{t-1} / S^{t-1}$. 1-я группа увеличивает КИМ на $8-10\% \cdot k$. 2-я группа увеличивает КИМ на $4-6\% \cdot k$. 3-я группа изменяет КИМ на $(-2\% \cdot k; +1\% \cdot k)$	1-я группа снижает КИМ на $2-3\% \cdot 1 / k$. 2-я группа снижает КИМ на $5-7\% \cdot 1 / k$. 3-я группа снижает КИМ на $8-15\% \cdot 1 / k$
Прироста мощности	$P = g \cdot D^{t-1} / S^{t-1}$, где g = коэффициент, учитывающий темп роста спроса. Фирмы всех групп увеличивают мощность на $4-6\% \cdot P$. Фирмы среднего размера (4–10 млн т) всех групп наращивают мощность на $8-9\% \cdot P$	Роста мощности нет

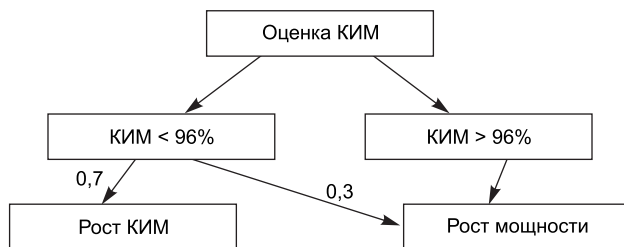


Рис. 3. Стратегии поведения фирм

а агенты среднего размера (с годовым объемом добычи 4–10 млн т вне зависимости от принадлежности к той или иной группе) наращивают мощность быстрее – на 8–9%.

возникающих убытков. При превышении расходов над доходами и при недостаточных размерах фонда накопления фирма продает часть мощности, необходимую для покрытия убытка. Таким образом, величина фонда накопления является одним из параметров выхода агентов из популяции.

Если КИМ не превысил 96%, то поведение агентов вариативно: либо с вероятностью 0,7 они увеличивают загрузку имеющихся мощностей (см. рис. 3), либо с вероятностью 0,3 наращивают производственные мощности. Если фирма выбрала стратегию наращивания мощности, то в текущем периоде КИМ корректируется пропорционально вновь введенным мощностям.

При избытке предложения роста мощностей не происходит, а КИМ сокращается до минимального уровня 20%.

Правило определения объема реализованной продукции. В модели мы делаем допущение, что в ситуации, когда спрос превышает предложение, объем реализованной продукции равен реальному выпуску. При возникновении излишка предложения объем реализованной продукции фирмы определяется пропорционально доле фирмы в совокупном предложении:

$$\begin{aligned}\tilde{Q}_i^t &= Q_i^t - (S^t - D^t) \cdot \left(\frac{Q_i^t}{S^t} \right) \quad \tilde{Q}_i^t = Q_i^t - (S - D) \cdot \left(\frac{Q_i^t}{S^t} \right) = \\ &= \tilde{Q}_i^t = Q_i^t - (S^t - D^t) \cdot \left(\frac{Q_i^t}{S^t} \right) = Q_i^t \cdot \frac{D^t}{S^t}.\end{aligned}$$

Данное предположение отражает пропорциональный характер снижения объемов реализации на предприятиях отрасли в условиях недостаточного спроса, однородности продукции и рынка, а также характеризует прямую зависимость объема продаж от рыночной конъюнктуры. Перепроизводство, на практике ведущее к образованию запасов, в модели в целях упрощения относится на издержки.

Описанная выше модель была реализована в пакете имитационного моделирования Anylogic advanced 6.8.0. Параметры модели, характеристики агентов и совокупного спроса в стартовый момент времени t_0 определялись фактическими данными базового 2005 г. Исходя из фактических среднегодовых темпов роста потребления энергетических углей за 2005–2011 гг. экзогенно задавался линейный прирост спроса, составляющий 2% в год⁵.

⁵ Это соответствует реальным среднегодовым темпам роста производства энергетических углей в РФ за моделируемый период времени.

АДЕКВАТНОСТЬ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Адекватность модели оценивалась на основании макро- и микропрогноза. Проверка осуществлялась посредством сравнения фактических и модельных данных об объемах производства выделенных агентов за 2009–2011 гг. и о совокупном выпуске отрасли за 2006–2011 гг. В целом модель продемонстрировала способность адекватно отражать макроповедение популяции агентов (динамику объемов производства отрасли), выражающуюся в близости модельных и фактических абсолютных значений производства угля и в их динамике, в динамике совокупных мощностей и среднего коэффициента загрузки последних⁶. На рисунке 4 тонкой ломаной линией соединены фактические значения производства энергетического угля в России в миллионах тонн. Широкая полоса отображает интервал разброса траекторий, удовлетворительно характеризующих динамику отраслевого производства. Можно заметить схожесть изменения фактических и модельных данных, что свидетельствует об адекватности модели макроуровня.

Полученные модельные показатели микроуровня (производства угля в разрезе выделенных агентов) также продемонстрировали достаточно хорошую близость к фактическим данным (табл. 3). Для оценки точности прогноза использовалось среднее квадратов отклонений реальных и прогнозных показателей по популяции агентов. Как видно из табл. 3, модель адекватно отражает микродинамику отрасли, что подтверждается более высоким качеством прогноза структуры производства (в разрезе выделенных агентов), нежели качеством оценок, базирующихся на предположении о пропорциональном увеличении объемов производства отдельных агентов или содержащихся в стратегических документах развития отрасли за 2005 г.

Также можно оценить адекватность модели на основании правильно предсказанных тенденций изменения выпуска у отдельных

⁶ Стоит отметить некоторые несоответствия в статистической информации по отрасли в целом и по отдельным предприятиям, составившие 7 млн т в исходном для моделирования 2005 г.

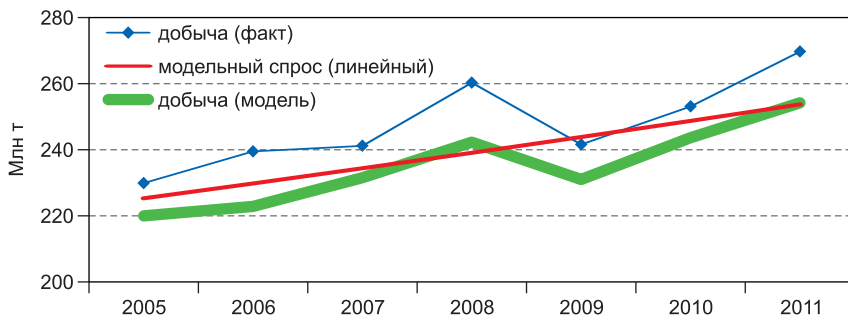


Рис. 4. Фактические и модельные показатели производства на отраслевом уровне

агентов. Мы различаем незначительное изменение производства относительно базового 2005 г., находящееся в интервале $(-5; +5)\%$, и выходящие за границы интервала значимые изменения в большую или меньшую сторону. Динамику изменения объемов производства у каждого агента считаем предсказанной верно, если фактические и модельные показатели изменения выпуска принадлежат к одной и той же из трех выделенных областей (неизменность объемов, значимые рост или снижение производства). В иных случаях считаем микроуровневый прогноз для конкретного агента неверным.

Таблица 3

Оценка точности модели на микроуровне

Прогноз	Среднее квадратов отклонений, абс. ед.			Средняя относительная ошибка, % от факта		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Фактическое изменение от факта 2005 г.	2,8	3,8	6,3	19	12	14
Стратегия от факта соответствующего года	5,0	3,3	4,6	20	15	7
Прогноз при сохранении структуры рынка 2005 г.	2,4	2,7	5,9	22	14	14
Модель от факта соответствующего года	1,7–2,1	1,6–1,9	3,3–3,8	20	9	11

Таблица 4

Оценка отраслевой динамики на микроуровне, % от числа агентов

Тенденция	2009	2010	2011
Предсказано верно	51	75	81
Предсказано неверно	49	25	19

Как следует из табл. 4, на 2010 и 2011 гг. для 75–80% агентов были правильно спрогнозированы тенденции микроуровня, что можно рассматривать как приемлемый результат. Наибольшие расхождения наблюдались в 2009 г., что можно объяснить его послекризисным характером и большим разбросом показателей выпуска вследствие раздвоения траектории развития на предыдущем шаге.

На рисунке 5 видно, что в каждом третьем прогоне макродинамика системы имела несколько иную траекторию: кризис произошел годом ранее. Данное поведение имитационной модели можно рассматривать как аналог точки бифуркации, когда незначительные изменения состояния системы могут привести к появлению альтернативных ветвей эволюции. В модели это реализуется при попадании (на определенном шаге) значения функции спроса в интервал разброса совокупного производства отрасли. И как следствие, упомянутые измене-

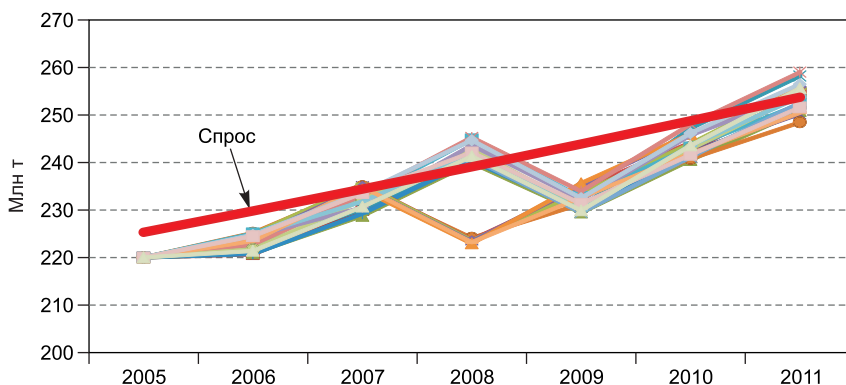


Рис. 5. Альтернативные траектории макродинамики модели (20 прогонов)

ния могут привести к раздвоению траектории развития в соответствии с правилами поведения агентов. Несмотря на то что после расхождения 2008 г. альтернативные пути развития вновь сближаются⁷, расхождения в совокупном выпуске по отрасли между основной и альтернативной траекториями 2009 г. остаются статистически значимыми.

В соответствии с заложенными в модель гипотезами и допущениями можно предположить, что кризис, произошедший в отрасли в 2009 г., вероятно, имел в том числе и внутрисистемные основания. В связи с этим цикличность развития отрасли представляет отдельный интерес.

Длительность цикла в базовом варианте модели (при 2%-м росте спроса) составляет 3 года. В соответствии с идеологией согласующихся с историей моделей интересно исследовать генерацию гипотетических ситуаций, расходящихся с фактической эволюцией отрасли. Рассмотрим, к примеру, как могло бы происходить развитие системы при иной динамике спроса.

Как следует из рис. 6, длительность естественных циклов отрасли, обусловленных коррекцией объемов производства, при заложенных в модель предположениях составляет 1–3 года при росте спроса в 1% в год (рис. 6а) и 4–7 лет при 3%-м росте (рис. 6б).

Возможно, в силу высокой чувствительности отраслевой динамики к изменению спроса ожидаемое в соответствии с базовой моделью снижение спроса в 2011–2012 гг. (см. рис. 5) в реальности не произошло, так как темп роста спроса начиная с 2009 г. по факту увеличился. Здесь стоит еще раз подчеркнуть гипотетичность, временную ограниченность и ретропрогнозный характер базовой модели. В ней гипотетичность подразумевает общий, структурный характер эволюционного моделирования; ограниченность во времени – априорно заданный интервал существования модели (2005–2011 гг.), за пределами которого она теряет смысл, так как рост спроса задавался исходя из темпа в 2% годовых (иной темп – иная динамика); ретропрогнозность – предположение о нахождении субъекта моделирования в 2005 г., откуда нам и «предстоит оценить» динамику отрасли.

⁷ Под воздействием коррекции, происходящей благодаря ориентации на единый уровень спроса.

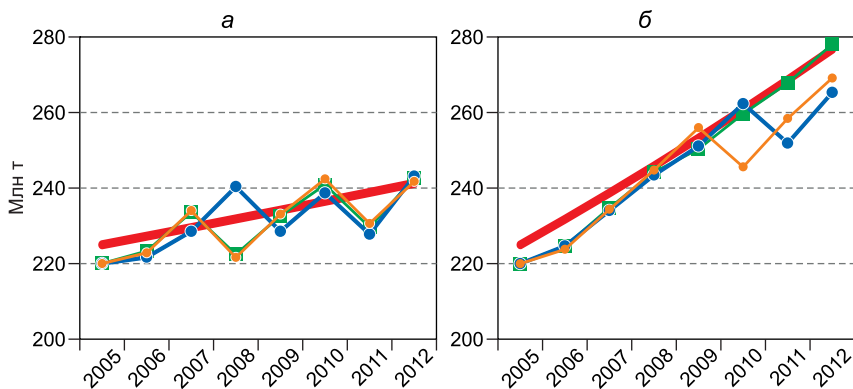


Рис. 6. Траектории отраслевой динамики при разных темпах роста спроса
a – линейный спрос с темпом 1%; *б* – линейный спрос с темпом 3%

Следует заметить, что временной интервал прогнозирования – существенное ограничение полученной модели. Это ограничение объективного характера. Поскольку в нашем распоряжении имелись данные в разрезе выделенных агентов только за 2005, 2009–2011 гг. и лишь совокупные объемы производства энергетического угля были известны за период 2005–2011 гг., модель строилась с t_0 , за которое был взят 2005 г., и ее калибровка на микроуровне осуществлялась в соответствии с результирующими показателями за 2009–2011 гг. Соответственно, временной интервал адекватности модели составляет 4–6 лет от t_0 . Проверка структурной адекватности модели в краткосрочном периоде не проводилась по причине отсутствия данных, и такая проверка представляет первоочередной интерес с точки зрения дальнейшей доработки и уточнения модели.

* * *

Построенная эволюционная агентная модель, объясняющая динамику развития экономической системы исходя из конкуренции на продуктовом рынке, показывает пригодность гипотезы о конкуренции как определяющем факторе эволюции отрасли в среднесрочной

перспективе. Агент-ориентированное моделирование продемонстрировало возможность более точного микро- и макропрогнозирования при оперировании сравнительно небольшим объемом данных: при знании фактических характеристик агентов в начальный момент времени и линейном предположении о динамике спроса. Это позволяет рассматривать предложенный подход в качестве методики экспресс-прогноза отраслевой и структурной динамики, которая выгодно отличается «легкостью» реализации и возможностью использования на практике. Полученную модель можно классифицировать как согласующуюся с историей, и правомерно утверждать, что она достаточно адекватна на среднесрочном интервале. Модель потенциально способна описывать кризисы как результат неверной оценки агентами текущего уровня спроса, более адекватно прогнозировать последствия, выражающиеся в структуре и динамике развития отрасли.

В соответствии с предназначением согласующихся с историей агент-ориентированных моделей нами изучено поведение отраслевой системы при различных параметрах спроса. Показано, что при изменении годовых темпов роста спроса на 1% длительность цикла развития резко меняется противоположно. Эта способность модели показывать альтернативность траекторий отраслевой динамики и оценивать продолжительность циклов позволяет ставить вопрос о необходимости выявления особых точек в жизненном цикле экономической системы и повышения эффективности регулирования в их окрестностях.

В целях более обоснованного применения полученной модели к задачам прогнозирования требуется доработка правил определения спроса и предложения, чему может способствовать имеющее самостоятельную ценность накопление фактических данных в разрезе выделенных параметров и переменных модели. Дальнейшие эксперименты с моделью возможны в направлениях усиления ее прогностических возможностей, введения инновационного поиска, учета входа агентов в популяцию и выхода из нее, влияния среды и мер институционального регулирования.

Литература

1. **Чернавский Д.С., Старков Н.И., Щербаков А.В.** О проблемах физической экономики // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 9. – С. 1045–1066.
2. **Занг В.Б.** Синергетическая экономика: Время и перемены в нелинейной экономической теории. – М.: Мир, 1999. – 335 с.
3. **Кюнтцель С.В.** Эволюционный подход при моделировании экономических процессов: методологический аспект: Автореф. дисс. ... канд. экон. наук. – М., 2010. – 24 с.
4. **Нельсон Р.Р., Винтер С.Дж.** Эволюционная теория экономических изменений. – М.: Дело, 2002. – 536 с.
5. **Карпов Ю.Г.** Имитационное моделирование систем: Введение в моделирование с AnyLogic 5 (+CD). – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 390 с.
6. **Полтерович В.М., Хенкин Г.М.** Эволюционная модель взаимодействия процессов создания и заимствования технологий // Экономика и математические методы. – 1988. – Т. XXIV, вып. 6. – С. 1071–1083.
7. **Маевский В.** Введение в эволюционную макроэкономику. – М.: Япония сегодня, 1997. – 108 с.
8. **Silverberg G., Verspagen B.** Evolutionary Theorizing on Economic Growth. – URL: <http://webarchive.iiasa.ac.at/Admin/PUB/Documents/WP-95-078.pdf> (дата обращения 03.04.2013).
9. **Iwai K.** Schumpeterian dynamics. P. I: An evolutionary model of innovation and imitation // Journal of Economic Behavior and Organization. – 1984. – V. 5. – P. 159–190.
10. **Суслов В.И.** Модели пространственной экономики: генезис, современное состояние, перспективы // Регион: экономика и социология. – 2013. – № 2 (78). – С. 3–19.
11. **Тамбовцев В.Л.** Методологический анализ и развитие экономической науки // Общественные науки и современность. – 2013. – № 4. – С. 42–53.
12. **Chang-Wook Kim, Keun Lee.** Innovation, technological regimes and organizational selection in industry evolution: A «History Friendly Model» of the DRAM industry // Industrial and Corporate Change. – 2003. – V. 12 (6). – P. 1195–1221.
13. **Malerba F., Nelson R., Orsenigo L., Winter S.** «History-friendly» models of industry evolution: the computer industry // Industrial and Corporate Change. – 1999. – V. 8. – P. 3–40.
14. **Malerba F., Nelson R., Orsenigo L., Winter S.** History-Friendly Models: An Overview of the Case of the Computer Industry II. – URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/3/6.html> (дата обращения 03.04.2013).
15. **Dosi G., Fagiolo G., Roventini A.** Schumpeter meeting Keynes: a policy-friendly model of endogenous growth and business cycles // Journal of Economic Dynamics and Control. – 2010. – V. 34, No. 9. – P. 1748–1767.
16. **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сулакшин С.С.** Применение вычислимых моделей в государственном управлении. – М., 2007. – 304 с.

17. **Fagiolo G., Pyka A.** Agent-Based Modelling: A Methodology for Neo-Schumpeterian Economics. – URL: <http://www.wiwi.uni-augsburg.de/vwl/institut/paper/272.pdf> (дата обращения 12.04.2013).
18. **Tesfatsion L.** Agent-based computational economics: a constructive approach to economic theory // Economics Department, Iowa State University, Ames, IA 50011-1070, 18 December 2005. – 55 p.
19. **Fagiolo G., Dosi G.** Exploitation, exploration and innovation in a model of endogenous growth with locally interacting agents // Structural Change and Economic Dynamics. – 2003. – V. 14. – P. 237–273.
20. **Saviotti S., Pyka A.** Micro and macro dynamics: industry life cycles, inter-sector coordination, co-evolution and aggregate growth // Journal of Evolutionary Economics. – 2008. – V. 18, No. 2. – P. 167–182.
21. **Minho Yoon, Keun Lee.** Agent-based and «History-Friendly» Models for explaining industrial evolution // Evol. Inst. Econ. Rev. – 2009. – V. 6 (1). – P. 45–70.
22. **Dawid H., Harting P.** Capturing firm behavior in agent-based models of industry evolution and macroeconomic dynamics // Applied Evolutionary Economics, Behavior and Organizations / Ed. by Bünstorf. – Edward-Elgar, 2010. – P. 103–130.
23. **Dawid H.** Agent-based models of innovation and technological change // Handbook of Computational Economics. V. 2: Agent-Based Computational Economics / Ed. by K. Judd and L. Tesfatsion. – North-Holland, 2005. – P. 1236–1267.
24. **Garavaglia Ch., Malerba F., Orsenigo L., Pezzoni M.** A history-friendly model of the evolution of the pharmaceutical industry: technological regimes and demand structure // Knowledge, Internationalization and Technology Studies Working Paper. – 2010, No. 36. – P. 55.
25. **Итоги** работы угольной промышленности России за 2005–2011 гг.: Аналитические обзоры. – URL: <http://www.ugolinfo.ru> (дата обращения 01.02.2013).
26. **Рынки** энергетических углей России: Информационно-аналитический обзор. – М.: Росинформуголь, 2009. – 60 с.
27. **Экономико-технологические** показатели работы предприятий угольной промышленности за 2005 г. – М.: Росинформуголь, 2005. – 84 с.
28. **Рынок** угля РФ. Энергетический уголь, антрацит, коксующийся уголь. – URL: <http://www.metalexper-group.com/index.html>, (дата обращения 12.04.2013).
29. **Терловой В.** Обзор рынка энергетического угля – тенденции и факторы влияния. – URL: <http://www.metalexper-group.com/index.html> (дата обращения 12.04.2013).
30. **BP:** статистический обзор мировой энергетики: Энергетика в 2011 году – шоки и стабильность. – URL: <http://www.bp.com/statisticalreview> (дата обращения 12.04.2013).
31. **Угольный** сектор РФ: рост мировых цен монетизируют не все. – URL: <http://www.finam.ru/file.asp?id=9447> (дата обращения 12.04.2013).

Рукопись статьи поступила в редколлегию 17.08.2013 г.

© Марков Л.С., Маркова В.М., Котёлкин Д.Д., 2013