

# **Включение блока инвестиций в агентно-ориентированную модель экономики**

*Александр Цыплаков*

*(в соавторстве с Дмитрием Доможировым, Наимджоном Ибрагимовым,  
Ларисой Мельниковой, Виктором Суловым)*

*Новосибирский национальный исследовательский государственный  
университет, экономический факультет  
и Институт экономики и организации промышленного производства  
СО РАН*

В докладе рассматривается дополнение агент-ориентированной межрегиональной многоотраслевой модели российской экономики (АОМММ) инвестиционным блоком, который позволит в дальнейшем моделировать различные динамические процессы, изменения в отраслевой и пространственной структуре экономики.

*Ключевые слова:* агентно-ориентированная модель, инвестиции, основной капитал.

## **Введение**

Агент-ориентированная межрегиональная многоотраслевая модель российской экономики (АОМММ) разрабатывается в ИЭОПП СО РАН и Новосибирском государственном университете. Модель относится к классу агентно-ориентированных моделей (АОМ).

Суть агентно-ориентированного подхода состоит в имитационном моделировании множества децентрализованных агентов и институциональной среды, в которой они взаимодействуют по определенным правилам (см. Tesfatsion, 2006; Макаров, Бахтизин, 2013). Особенностью АОМ является то, что у системы в целом нет каких-то общих целей, цели могут быть только у агентов. Агенты действуют по сравнительно простым алгоритмам, но могут адаптироваться путем обучения и эволюции. Способом реализации таких моделей является компьютерное моделирование.

На предыдущем этапе разработки АОМММ по своей структуре напоминала статическую модель общего равновесия. В настоящее время решается задача поэтапного превращения модели в динамическую. Привнесение динамики требует в числе прочего адекватного представления процессов использования и создания основного капитала, т. е. реализации развернутого инвестиционного блока.

Дополнение АОМММ инвестиционным блоком позволит изучать динамику производственного потенциала. Важным является то, что моделируемая экономика может как расти, так и сокращаться в результате независи-

мых инвестиционных решений отдельных фирм и домохозяйств. Эти же решения обуславливают и изменения в отраслевой и пространственной структуре экономики.

При введении капитала и инвестиций в модель следует дать ответы на следующие основные вопросы:

- как основной капитал учитывается в технологиях фирм?
- как производятся капитальные блага?
- как происходит выбытие (износ, устаревание) имеющегося основного капитала?
- как фирма принимает решения об объеме инвестиций (в денежном выражении)?
- как выбранный объем инвестиций определяет спрос фирмы на капитальные блага?
- какие статистические показатели, связанные с капиталом и инвестициями, следует собирать при проведении расчетов по модели?

## **Краткое описание АОМММ**

Подробнее агент-ориентированная межрегиональная многоотраслевая модель российской экономики описана в (Суслов и др., 2014, Суслов и др., 2016, Суслов, Новикова, Цыплаков 2016, Доможиров и др. 2017a,b). Здесь мы дадим только краткое описание.

Объектом моделирования в АОМММ является экономика России с ее обширной территорией и делением на регионы. Лежащий в основе программно-модельный комплекс, реализованный на языке программирования Lua, по своей структуре является блочным, расширяемым и обладает большой универсальностью, что позволяет развивать модели самой разной конфигурации.

На этапе инициализации используется информация, относящаяся к российской экономике. Агенты размещаются на карте на основе координат городов, реальных данных о демографии и показателей хозяйственной деятельности. Кроме того, АОМММ совместима и обменивается информацией с существующей межотраслевой межрегиональной моделью России. Она использует ту же региональную и производственную номенклатуру, те же коэффициенты в леонтьевских производственных функциях и т. д.

Мы в явном виде учитываем пространство, рассматривая взаимодействие торгующих агентов, расположенных на карте. Агенты (фирмы, домохозяйства, товарные рынки, рынок труда и внешние рынки) принимают решения на основе микроэкономических моделей при ограниченной рациональности с учетом транспортных расходов.

В модель встроена система статистического учета. Показатели собираются по отдельным агентам, макрорегионам и секторам и визуализируется графиками. Также заполняются различные таблицы «затраты-выпуск», с

помощью которых можно проводить структурный анализ результатов расчетов.

АОМММ отличается от известных агентно-ориентированных моделей тем, что: 1) представляет экономику в целом, а не отдельный сегмент рынка; 2) явным образом учитывает пространственное размещение агентов и транспортные издержки; 3) совместима с действующей нормативной моделью и основана на реальной информации.

С точки зрения развития блока инвестиций важно, что производство в модели описывается леонтьевскими технологиями:

$$y = \min\{\min_i\{x_i/a_i\}, K/a_K, L/a_L\},$$

где  $y$  – объем производства в рассматриваемый период;  $x_i$  – количество затрачиваемого производственного фактора (сырья, материалов и т. д.) из сектора  $i$ ;  $a_i$  – технологический коэффициент,  $K$  – основной капитал,  $a_K$  – коэффициент капиталоемкости,  $L$  – используемое количества труда,  $a_L$  – коэффициент трудоемкости. В действующем варианте модели имеется один вид капитала. Каждая фирма обладает некоторым неизменным запасом капитала, и этот запас определяет максимально достижимый объем производства.

Рынок труда моделируется упрощенным образом. Предложение труда домохозяйствами фиксировано. Агент «Рынок труда» осуществляет нащупывание равновесия подобно вальрасовскому аукционисту. Поскольку предложение труда не растет, имеется естественное ограничение для роста экономики, так что динамические процессы сводятся в первую очередь к изменению пространственной и отраслевой структуры производства.

### **Основной капитал и инвестиции в существующих агентно-ориентированных моделях**

На данный момент моделирование инвестиций в наиболее разработанных пространственных агент-ориентированных моделях Eurace@Unibi и МАВМ-II организовано следующим образом. В модели Eurace@Unibi (Dawid et al. 2014; Dawid, Harting, 2012) имеется две разновидности фирм, производящие потребительские и инвестиционные товары соответственно. Фирмы, производящие потребительские товары, владеют запасами капитала (инвестиционного товара). Эти запасы подвержены износу с постоянным коэффициентом износа и восполняются за счет инвестиций. Фирмы сравнивают планируемый объем производства с потенциально достижимым, который может быть произведен при имеющихся запасах капитала. По результатам сравнения они принимают решения об инвестициях. Особенностью модели является наличие нескольких поколений инвестиционного товара разного качества. Качество (потенциальная производительность) новых поколений инвестиционного товара растет согласно стохастическому процессу, моделирующему технический прогресс. Инвестиционный сектор в модели довольно упрощенный. Его поведение определяется простыми правилами:

сектор обеспечивает неограниченное количество инвестиционного товара по экзогенно зафиксированной цене. В модели MABM-II (Grazzini J., Assenza T., Delli Gatti D. 2012) инвестиции моделируются по схожей схеме, но с тем отличием, что износ начисляется не на весь капитал, а на используемую его часть.

Этот подход представляется чрезмерно упрощенным, более того, совершенно не учитывается выгодность инвестиционных вложений. Инвестиции осуществляются автоматически, как только повышается спрос на соответствующие товары. Кроме того, при таком подходе игнорируются межотраслевые взаимодействия, в частности капиталобразующие отрасли не используют инвестиционные товары. Таким образом, опыт существующих АОМ малопригоден для наших целей.

### **Разрабатываемый инвестиционный блок в АОМММ**

Вместо одного вида капитала в модель введено несколько видов. В базовом варианте модели используется два вида капитала – условно «Станки и оборудование» и «Здания и сооружения». Для производства капитальных благ используются леонтьевские технологии соответствующих отраслей – «Обработки» и «Строительства».

У каждой фирмы есть некоторые однородные запасы  $K_c$  капитала каждого вида  $c = 1, \dots, N_c$  (однородные в том смысле, что нет различия по возрасту, поколениям капитала). Каждый вид капитала характеризуется фондёмкостью  $a_{Kc}$ . Запасы капитала задают ограничения сверху на объем производства:  $y \leq K_c/a_{Kc}$ .

Выбытие капитала каждого вида  $c$  определяется некоторым постоянным коэффициентом выбытия  $\delta_c$ .

Капитал возмещается за счет инвестиций. Инвестиции безгранично делимые, дискретность капитала не учитывается. Инвестиционные лаги также не учитываются.

Инвестиционный блок включает модель принятия фирмой решения об объеме инвестиций. Выбранный объем инвестиций разбивается по видам капитала. При расчете спроса на инвестиционные товары фирма ориентируется на соответствующий плановый достижимый объем производства и учитывает выбытие, коэффициенты фондёмкости и ожидаемые цены приобретения капитала.

Далее опишем последовательность событий, связанных с капиталом и инвестициями, в пределах одного периода. При этом пусть  $K_c$  – (основной) капитал вида  $c$ , который используется в производстве в текущий период. Это величина, которая остается после выбытия и инвестиций в новый капитал. Она остается такой до конца периода.  $K_c^{(-1)}$  – этот же показатель в предыдущем периоде и в начале текущего периода. В течение периода происходят следующие события.

1) Капитал вида  $c$  выбывает с коэффициентом выбытия  $\delta_c$ , и в результате остается  $(1 - \delta_c)K_c$ .

2) Фирма планирует величину закупки капитала каждого вида  $D_{Kc}$  (в натуральном выражении), так чтобы ожидаемые издержки на покупку всех видов капитала были равны планируемому объему инвестиций  $\text{PIInv}^{(-1)}$ , рассчитанному в конце предыдущего периода. При расчете ожидаемых издержек используются ожидаемые цены  $\bar{p}_c$ :

$$\text{PIInv}^{(-1)} = \sum_{c=1}^{N_c} \bar{p}_c D_{Kc}.$$

3) Фирма производит продукцию с использованием капитала  $K_c, c = 1, \dots, N_c$  (т. е. величина  $K_c$  подставляется в леонтьевскую производственную функцию). Одновременно фирма делает запланированные закупки капитальных благ  $D_{Kc}$ , так что

$$K_c = (1 - \delta_c)K_c^{(-1)} + D_{Kc}.$$

4) Фирма после совершения всех сделок и уплаты налогов получает некоторую величину прибыли, доступной для инвестиций,  $\text{ProfitInv}$ . Если  $\text{ProfitInv} > 0$ , то фирма вычисляет планируемый объем инвестиций для следующего периода  $\text{PIInv}$ , такой что  $0 \leq \text{PIInv} \leq \text{ProfitInv}$ . Оставшаяся сумма идет на выплату дивидендов собственникам:  $\text{Dividends} = \text{ProfitInv} - \text{PIInv}$ . Если  $\text{ProfitInv} < 0$ , т.е. фирма убыточна, то  $\text{PIInv} = 0$ ,  $\text{Dividends} = 0$ . Предполагаем, что фирма обращается за помощью в покрытии убытков к правительству.

### Планирование спроса на капитальные блага

Рассмотрим, как фирма планирует спрос на капитальные блага при данном планируемом объеме инвестиций  $\text{PIInv}^{(-1)} \geq 0$ , рассчитанном в конце предыдущего периода.

Если в предыдущем периоде капитал  $c$ -го вида был равен  $K_c^{(-1)}$ , то в результате выбытия в текущем периоде останется  $(1 - \delta_c)K_c^{(-1)}$ . Чтобы довести свои текущие запасы капитала до уровня  $K_c$ , фирма должна произвести закупки  $c$ -го капитального блага в объеме

$$D_{Kc} = K_c - (1 - \delta_c)K_c^{(-1)}.$$

При использовании леонтьевских производственных функций объем производства у ограничен неравенствами

$$y \leq \frac{K_c}{a_{Kc}}.$$

Если фирма планирует производить не меньше, чем  $y^*$ , то ей следует запланировать закупки  $c$ -го капитального блага на уровне не меньшем, чем  $a_{Kc}y^* - (1 - \delta_c)K_c^{(-1)}$ . Таким образом, если ориентироваться на уровень выпуска  $y^*$ , то следует запланировать закупки  $c$ -го капитального блага в объеме

$$D_{Kc} = \max\{a_{Kc}y^* - (1 - \delta_c)K_c^{(-1)}, 0\}.$$

(Эта формула учитывает, что имеющийся капитал нельзя продать.)

Следовательно, мы можем рассмотреть задачу выбора планового уровня мощностей  $y^*$  по данному планируемому объему инвестиций  $PInv^{(-1)}$ . Если  $y^*$  будет найден, то  $D_{Kc}$  рассчитываются по указанной формуле. Поскольку цены капитальных благ заранее неизвестны, то при планировании используются ожидаемые цены  $\bar{p}_c$ . Следует подобрать  $y^*$  таким образом, чтобы выполнялось

$$PInv^{(-1)} = \sum_{c=1}^{N_c} \bar{p}_c D_{Kc}.$$

Получили уравнение для планового уровня производственных мощностей  $y^*$ :

$$PInv^{(-1)} = \sum_{c=1}^{N_c} \bar{p}_c \max\{a_{Kc}y^* - (1 - \delta_c)K_c^{(-1)}, 0\}.$$

Один из способов решения этого уравнения описан в Приложении.

### **Планирование объема инвестиций: простые варианты**

Рассмотрим теперь выбор фирмой величины  $PInv$  – планируемого объема инвестиций. Для моделирования динамики необходимо поставить решения об инвестициях в зависимость от финансовых результатов деятельности фирмы. Желательно, чтобы убыточные фирмы сокращали основные фонды, а прибыльные наращивали. При этом налогооблагаемая прибыль и обычная («бухгалтерская») амортизация важны для расчета налогов, но не для инвестиций.

Предполагаем, что  $ProfitInv > 0$ , где  $ProfitInv$  – прибыль, доступная для инвестиций (это прибыль после налогообложения и из нее не вычитается амортизация). Общее ограничение на величину инвестиций – это что  $PInv$  неотрицательно и не выше  $ProfitInv$ . Остаток прибыли идет на дивиденды:  $Dividends = ProfitInv - PInv$ .

При определении объема инвестиций следует учитывать, что в модели используются леонтьевские производственные функции, в связи с чем объем производства  $y$  ограничен неравенствами

$$y \leq K_c / a_{Kc}$$

для всех видов капитала  $c$ . Величину  $\hat{y} = \min_c \frac{K_c}{a_{Kc}}$  можно назвать уровнем производственных мощностей фирмы. Она задает ограничение сверху на объем производства.

**Режим 1** – поддержание первоначальных производственных мощностей.

Режим нацелен на поддержание стационарного состояния с точки зрения запасов капитала. В стационарном состоянии при этом режиме требуется просто полностью возмещать выбытие, так что спрос на инвестиционный товар равен выбытию капитала соответствующего вида.

Пусть  $\hat{y}$  – размер первоначальных производственных мощностей, так что фирма пытается по мере возможности поддерживать мощности на уровне  $\hat{y}$ .

Если  $K_c$  – текущий капитал вида  $c$ , то в следующем периоде останется  $(1 - \delta_c)K_c$ . В то же время для производства  $\hat{y}$  требуется не меньше  $a_{Kc}\hat{y}$ . Таким образом, с учетом имеющихся средств ProfitInv планируемые инвестиции равны

$$PIInv = \min \left\{ \sum_{c=1}^{N_c} \bar{p}_c \max\{a_{Kc}\hat{y} - (1 - \delta_c)K_c, 0\}, ProfitInv \right\}.$$

При наличии убыточных фирм здесь возникает проблема, что первоначальные производственные мощности не могут сохраняться в полном объеме.

Режим 2 – фиксированная доля от имеющихся средств.

Этот вариант предполагает, что объем инвестиций равен фиксированной доле от прибыли. Оставшееся тратится на дивиденды.

Если имеется  $ProfitInv > 0$ ,  $\kappa \in (0; 1)$  – доля, то инвестиции равны

$$PIInv = \kappa ProfitInv.$$

Режим 3 – фиксированная доля от имеющихся средств сверх возмещения выбытия.

Для возмещения выбытия требуется

$$Depr = \sum_{c=1}^{N_c} \bar{p}_c \delta_c K_c.$$

Если имеется  $ProfitInv > 0$ ,  $\kappa \in (0; 1)$  – доля, то инвестиции равны

$$PIInv = \min\{Depr + \kappa(ProfitInv - Depr), ProfitInv\}.$$

### **Планирование объема инвестиций с использованием NPV**

Более сложный вариант подразумевает принятие инвестиционных решений на основе прогнозирования цен и спроса на продукцию и вычисления показателя NPV. Используется некоторая единая ставка процента  $r$ , по которой фирмы оценивают выгодность инвестиций.

1) Строится прогноз зависимости прибыли от величины производственных мощностей  $\hat{y}$ :  $ProfitInv(\hat{y})$ . Например, можно рассчитывать ожидаемый коэффициент  $\bar{c} \approx ProfitInv/\hat{y}$  так что  $ProfitInv(\hat{y}) = \bar{c}\hat{y}$ . Более общая формула, которую можно здесь использовать, имеет вид

$$ProfitInv(\hat{y}) = (c_0 - c_1 \ln \hat{y})\hat{y}$$

или

$$ProfitInv(\hat{y}) = (c_0 - c_1\hat{y})\hat{y}.$$

Коэффициенты  $c_0$  и  $c_1$  требуется каким-то способом оценить.

2) Вычисляются для разных уровней производственных мощностей  $\hat{y}$  соответствующие требуемые инвестиции

$$\text{ReqInv}(\hat{y}) = \sum_{c=1}^{N_c} \bar{p}_c \max\{a_{Kc}\hat{y} - (1 - \delta_c)K_c, 0\}.$$

Для возмещения выбытия требуется примерно

$$\text{Depr}(\hat{y}) = \sum_{c=1}^{N_c} \bar{p}_c \delta_c a_{Kc} \hat{y}.$$

Если  $r$  – ставка процента, то чистая приведенная стоимость примерно равна

$$\begin{aligned} \text{NPV}(\hat{y}) &= \\ &= -\text{ReqInv}(\hat{y}) + (\text{ProfitInv}(\hat{y}) - \text{Depr}(\hat{y})) \left( 1 + \frac{1}{1+r} + \frac{1}{(1+r)^2} + \dots \right) = \\ &= -\text{ReqInv}(\hat{y}) + (\text{ProfitInv}(\hat{y}) - \text{Depr}(\hat{y})) \frac{1+r}{r}. \end{aligned}$$

Выбирается (приблизительно, с учетом не полной рациональности) уровень мощностей  $\hat{y}$ , дающий максимальное значение  $\text{NPV}(\hat{y})$ .

## Заключение

Предполагается проведение экспериментальных расчетов по модели. В частности, можно рассмотреть динамику производства при разных значениях ставки  $r$ , регулирующей соотношение между потреблением и накоплением. В экспериментах можно отслеживать изменение отраслевой и региональной структуры производства.

Одним из перспективных направлений дальнейших исследований могут быть эксперименты в русле новой теории торговли и новой экономической географии; см. напр. (Combes, Mayer, Thisse 2008).

## Библиография

1. Доможиров Д. А., Ибрагимов Н. М., Мельникова Л. В., Цыплаков А. А. Интеграция подхода „затраты–выпуск“ в агентно-ориентированное моделирование: межрегиональный анализ в искусственной экономике // Мир экономики и управления. 2017. Т. 17. (в печати)
2. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). – М.: Экономика, 2013. 295 с.
3. Суслов В. И., Доможиров Д. А., Ибрагимов Н. М., Костин В. С., Мельникова Л. В., Цыплаков А. А. Опыт агент-ориентированного моделирования пространственных процессов в большой экономике // Регион: экономика и социология. 2014. № 4. С. 32-54.
4. Суслов В. И., Доможиров Д. А., Ибрагимов Н. М., Костин В. С., Мельникова Л. В., Цыплаков А. А. Агент-ориентированная многорегиональная мо-



дель “затраты–выпуск” российской экономики // Экономика и математические методы. 2016. Т. 52. № 1. С. 112-131.

5. Суслов В. И., Новикова Т. С., Цыплаков А. А. Моделирование роли государства в пространственной агент-ориентированной модели. // Экономика региона. 2016. Т. 12. Вып. 3. С. 951–965.

6. Combes P.-P., Mayer T., Thisse J.-F. *Economic geography: The integration of regions and nations*. Princeton: Princeton University Press, 2008. 416 pp.

7. Dawid H., Gemkow S., Harting P., Hoog S. van der, Neugart M. (2014). Agent-Based Macroeconomic Modeling and Policy Analysis: The Eurace@Unibi Model. [Электронный ресурс] // Bielefeld Working Papers in Economics and Management No. 1-2014. Режим доступа: <http://ssrn.com/abstract=2384391>, свободный. Загл с экрана. Яз. англ. (дата обращения: ноябрь 2014 г.).

8. Dawid H., Harting P. (2012) Capturing Firm Behavior in Agent-Based Models of Industry Evolution and Macroeconomic Dynamics. – In: Buenstorf G. (ed.). *Evolution, Organization and Economic Behaviour*. – Ch. 6. – Edward Elgar Publishing.

9. Gintis H. The dynamics of general equilibrium // *Economic Journal*. 2007. Vol. 117. Issue 523. P. 1280–1309.

10. Grazzini J., Assenza T., Delli Gatti D. (2012). The Macroeconomic Agent Based Model (MABM). Towards Mark II. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://ec.europa.eu/information\\_society/apps/projects/logos/1/288501/080/deliverables/001\\_CRISISD32TABM2.pdf](http://ec.europa.eu/information_society/apps/projects/logos/1/288501/080/deliverables/001_CRISISD32TABM2.pdf), свободный. Загл с экрана. Яз. англ. (дата обращения: ноябрь 2012 г.)

11. Mandel A., Fürst S., Lass W., Meissner F, Jaeger C. Lagom generic: An agent-based model of growing economies // ECF Working Paper 1/2009. 2009. 21 pp. Режим доступа: [http://diva-model.net/fileadmin/ecf-documents/publications/ecf-working-papers/mandel-fuerst-lass-meissner-jaeger\\_ecf-working-paper\\_2009-01.pdf](http://diva-model.net/fileadmin/ecf-documents/publications/ecf-working-papers/mandel-fuerst-lass-meissner-jaeger_ecf-working-paper_2009-01.pdf), свободный. Загл с экрана (дата обращения: ноябрь 2016 г.).

12. Tesfatsion L. Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory // Tesfatsion L. and Judd K.L. (Eds.) *Handbook of computational economics, Vol.II*. Amsterdam: North-Holland, 2006. P. 831-880.

## Приложение

Требуется решить следующее уравнение для планового уровня производственных мощностей  $y^*$ :

$$PIInv^{(-1)} = \sum_{c=1}^{N_c} \bar{p}_c \max\{a_{Kc}y^* - (1 - \delta_c)K_c^{(-1)}, 0\}.$$

Справа здесь стоит кусочно-линейная функция от  $y^*$  с изломами в точках

$$\hat{y}_c = \frac{(1 - \delta_c)K_c^{(-1)}}{a_{Kc}}$$

Эта функция монотонно возрастает от нуля до бесконечности при  $y^* \geq \min_c \hat{y}_c$ . Следовательно, у данного уравнения существует единственный корень. Чтобы его найти, отсортируем границы  $\hat{y}_c$  в порядке возрастания.

Пусть  $\langle i \rangle$  – индекс  $i$ -й по порядку границы. Если искомый уровень  $y^*$  расположен между  $n$ -й и  $(n + 1)$ -й границей, то должно выполняться

$$\text{PIInv}^{(-1)} = y^* \sum_{i=1}^n \bar{p}_{\langle i \rangle} a_{K \langle i \rangle} - \sum_{i=1}^n (1 - \delta_{\langle i \rangle}) K_{\langle i \rangle}^{(-1)}.$$

Таким образом, здесь подходит величина

$$y^* = \frac{\text{PIInv}^{(-1)} + \sum_{i=1}^n (1 - \delta_{\langle i \rangle}) K_{\langle i \rangle}^{(-1)}}{\sum_{i=1}^n \bar{p}_{\langle i \rangle} a_{K \langle i \rangle}},$$

для которой выполнено

$$\hat{y}_{\langle n \rangle} < y^* \leq \hat{y}_{\langle n+1 \rangle},$$

где можно положить  $\hat{y}_{\langle N_c+1 \rangle} = \infty$ . Можно проверять по очереди ( $n = 1, n = 2, \dots$ ) и остановиться, когда в первый раз окажется  $y^* \leq \hat{y}_{\langle n+1 \rangle}$ .